



SISTEMA DE CONTROL DE TERMOCICLADOR PARA LA DIFERENCIACIÓN DE CÉLULAS MADRE

**Trabajo de Fin de Grado presentado en la
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación de Barcelona
(Universidad Politécnica de Cataluña)
por Carla Alonso Planas**

**En cumplimiento parcial
de los requisitos para el grado en
Ingeniería de Sistemas Electrónicos**

Director: Ramon Bragós Bardia

Barcelona, Junio de 2016

Abstract

Biotechnology and, in particular, tissue engineering based on the use of stem cells, have a great interest in the last years, although there is still a lack of knowledge about their niches, i.e., the physical and chemical environment around them and the responsible for regulating their evolution.

This project is a proposal to improve some instrumental aspects that are used for stem cell differentiation, specifically for changes in the adhesion of the cells to a dynamic substrate created with a polymer that changes its properties when passing a temperature threshold known as LCST. It is taken as a point of departure a previous master thesis on Biomedical Engineering.

The purpose of this project is to design, implement and validate a control system applied to a set of culture plates to perform thermal cycles around this threshold. It is intended that the system is automated and improve the current switching times between temperatures.

Resum

La biotecnologia, i en particular l'enginyeria de teixits basada en l'ús de cèl·lules mare, tenen des de fa uns anys un gran interès, tot i que hi ha encara un gran desconeixement sobre els seus nínxols, és a dir, l'entorn físic i químic que les envolta i l'encarregat de regular la seva evolució.

Aquest projecte és una proposta de millora d'alguns aspectes instrumentals que s'empren per a la diferenciació de cèl·lules mare, i en concret per als canvis en l'adherència de cultius d'aquestes a un substrat dinàmic creat amb un polímer que canvia de propietats en traspasar un llindar de temperatura conegut com LCST. Es parteix del procediment desenvolupat en una tesi de màster d'Enginyeria Biomèdica anterior.

El propòsit d'aquest projecte és dissenyar, implementar i validar un sistema de control aplicat a un conjunt de plaques de cultiu per a la realització de cicles tèrmics al voltant d'aquest llindar. Es pretén que el sistema estigui automatitzat i que millori els temps de commutació entre temperatures amb què es treballa actualment.

Resumen

La biotecnología, y en particular la ingeniería de tejidos basada en el uso de células madre, tienen desde hace unos años un gran interés, aunque existe todavía un gran desconocimiento sobre sus nichos, es decir, el entorno físico y químico que las rodea y el encargado de regular su evolución.

Este proyecto es una propuesta de mejora de algunos aspectos instrumentales que se emplean para la diferenciación de células madre, y en concreto para los cambios en la adherencia de cultivos de éstas a un sustrato dinámico creado con un polímero que cambia de propiedades al traspasar un umbral de temperatura conocido como LCST. Se parte del procedimiento desarrollado en una tesis de máster de Ingeniería Biomédica anterior.

El propósito de este proyecto es diseñar, implementar y validar un sistema de control aplicado a un conjunto de placas de cultivo para la realización de ciclos térmicos alrededor de dicho umbral. Se pretende que el sistema esté automatizado y que mejore los tiempos de conmutación entre temperaturas con los que se trabaja actualmente.

A mis padres, Jose y Yolanda,
por invertir en mí su tiempo, amor y recursos,
por darme la libertad de elegir mi camino.

A mi hermano Enric y también a Rubén,
por su apoyo y paciencia durante el camino,
por no dejar de creer en mí en ningún momento.

A David, y a los que se fueron durante esta etapa,
por enseñarme a relativizar la dureza de la carrera,
por enseñarme a ser más fuerte y a no rendirme.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a todos los que han hecho posible este proyecto, ya sea de manera directa, aportando conocimientos y sabiduría, o indirecta, dando los ánimos que tanto se necesitan. Gracias por iluminarme el camino y hacer más ameno el esfuerzo.

Sobre todo, quiero agradecer a Ramon el darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto tan interesante, el tercero a su lado. Muchas gracias por tu vocación y humanidad, por ser tan cercano y tan auténtico. Eres una inspiración y un modelo a seguir.

Gracias también, por sus contribuciones y ayuda, a las personas que están trabajando o desarrollando sus respectivos proyectos en el Laboratorio de Instrumentación y Bioingeniería, donde he pasado estos meses realizando el mío.

Por último, agradecer a los científicos del IBEC, George Altankov y Laura Ramalho, su colaboración e interés en la mejora desarrollada para sus investigaciones y el haberse prestado a trabajar conjuntamente en la obtención de resultados.

Historial de revisiones y registro de aprobación

Revisión	Fecha	Propósito
0	30/05/2016	Creación del documento
1	06/06/2016	Revisión: Tabla de contenidos, introducción, fundamentos teóricos
2	10/06/2016	Revisión: Estado del arte, fundamentos teóricos
3	20/06/2016	Revisión: Metodología y desarrollo del proyecto, costes
4	23/06/2016	Revisión: Resumen, validación y resultados, conclusiones y líneas futuras
5	26/06/2016	Revisión: Formato general
6	27/06/2016	Aprobación final del documento

LISTA DE DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO

Nombre	e-mail
Carla Alonso Planas	carla.alonso.planas@alu-etsetb.upc.edu
Ramon Bragós Bardia	rbb@eel.upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Fecha	27/06/2016	Fecha	27/06/2016
Nombre	Carla Alonso Planas	Nombre	Ramon Bragós Bardia
Posición	Autora del proyecto	Posición	Supervisor del proyecto

Tabla de contenidos

Abstract	1
Resum	2
Resumen	3
Agradecimientos	5
Historial de revisiones y registro de aprobación	6
Tabla de contenidos	7
Lista de Figuras	9
Lista de Tablas	11
1. Introducción	12
1.1. Motivación y objetivos	12
1.2. Antecedentes	12
1.3. Requerimientos y especificaciones.....	14
1.4. Plan de trabajo	15
2. Estado del arte	17
2.1. Las células madre y su diferenciación	17
2.2. Nichos dinámicos con biomateriales sensibles a estímulos	18
3. Fundamentos teóricos	19
3.1. Principios de termoelectricidad	19
3.1.1. Efecto Seebeck	19
3.1.2. Efecto Peltier	20
3.1.3. Efecto Joule	21
3.1.4. Efecto Thomson	21
3.1.5. Ley de Fourier	21
3.2. Sistemas térmicos	22
3.2.1. Celdas Peltier	22
3.2.2. Otros sistemas térmicos	23
3.3. Sensores de temperatura	23
3.3.1. Termopares.....	23
3.3.2. Otros sensores de temperatura	25
3.4. Sistemas de control	25
3.4.1. Control PID.....	26
3.4.2. Métodos de caracterización y diseño de un sistema de control	28

4. Metodología y desarrollo del proyecto	29
4.1. Consideraciones prácticas.....	29
4.2. Diseño físico del actuador	29
4.3. Caracterización del actuador	34
4.4. Implementación del control.....	35
4.5. Caracterización del control	42
4.6. Propuesta de sistema mínimo	42
5. Validación y resultados.....	44
6. Costes	46
7. Conclusiones y líneas futuras	48
Bibliografía.....	49
Anexos	51
Anexo A. Plan de trabajo detallado	51
Anexo B. Consideraciones en el diseño del actuador.....	53
Comparación del comportamiento de la temperatura en la superficie de una celda Peltier con y sin refrigerador líquido.....	53
Comparación del comportamiento de la temperatura medida en la superficie de la celda Peltier o en la superficie del pocillo de la micro placa.....	55
Comparación de la velocidad y la homogeneidad de las distintas configuraciones del actuador	56
Anexo C. Consideraciones en la implementación del control	57
Adquisición de datos con Agilent 34972A	57
Módulo Agilent 34901A (20 Channel Multiplexer)	58
Módulo Agilent 34907A (Multifunction Module DIO / Totalize / DAC)	59
Anexo D. Consideraciones para la caracterización del control	60
Anexo E. Consideraciones para el entendimiento del software en LabVIEW	62
Bloques de LabVIEW usados en el desarrollo del software	62
PWM en tiempo.....	64
Selección del modo (calentar o enfriar)	65
Reinicio de la memoria en el bloque PID	66
Interface de usuario.....	67
Anexo F. Consideraciones para mejoras y líneas futuras.....	68
Código VBA de la macro en Excel.....	68
Código Arduino de la propuesta de sistema mínimo	70

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema de control de temperatura actual en el IBEC. Fuente: [1].	13
Figura 2. Diagrama de Gantt del proyecto.	16
Figura 3. Esquema de la división asimétrica de una célula madre. Fuente: [4].	17
Figura 4. Condiciones de adherencia según la temperatura. Fuente: [6] (modificada).	18
Figura 5. Efecto Seebeck en circuito abierto (izqda.) y en circuito cerrado (dcha.). Fuente: [9]...	19
Figura 6. Efecto Peltier entre los materiales A y B. Fuente: [8] (modificada).	20
Figura 7. Comportamiento según el signo del coeficiente Peltier. Fuente: [7].	20
Figura 8. Estructura interna de una celda Peltier. Fuente: [10].	22
Figura 9. Estructura de un termopar de Fe-C. Fuente: [13].	23
Figura 10. Termopar de Fe-C unido a un bloque isotérmico. Fuente: [15].	24
Figura 11. Diagrama de un sistema de control.	25
Figura 12. Diagrama de un sistema de control en lazo cerrado.	26
Figura 13. Respuesta de la planta con el método basado en la curva de reacción. Fuente: [17].	28
Figura 14. De izquierda a derecha, capas de las configuraciones 1, 2, 3 y 4.	32
Figura 15. Esquema de la conexión eléctrica de la matriz de celdas Peltier.	33
Figura 16. Configuración definitiva del actuador.	33
Figura 17. Panel frontal del DAQ Agilent 34972A. Fuente: [24].	34
Figura 18. Calibración de los termopares con el micro baño 7102 de Fluke Calibration.	35
Figura 19. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 1.	36
Figura 20. Características de los relés usados para el circuito de conmutación. Fuente: [26].	37
Figura 21. Esquemático del circuito de conmutación.	37
Figura 22. Circuito de conmutación.	38
Figura 23. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 2.	39
Figura 24. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 3.	39
Figura 25. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 4 para el caso de calentar.	41
Figura 26. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 4 (versión definitiva).	41
Figura 27. Respuesta del control PID obtenido en el laboratorio.	42
Figura 28. Circuito implementado para el sistema mínimo.	43
Figura 29. Interface de usuario desarrollada con Microsoft Visual Studio.	43
Figura 30. Test en el laboratorio del Departamento.	44
Figura 31. Primer test en el IBEC (realizado sólo con agua).	44
Figura 32. Respuesta del control PID obtenido en el laboratorio.	45
Figura 33. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier sin refrigerador.	53
Figura 34. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier con el refrigerador apagado.	54
Figura 35. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier con el refrigerador encendido.	54

Figura 36. Respuesta de la temperatura en la cara superior de la celda Peltier.	55
Figura 37. Respuesta de la temperatura en el fondo del pocillo de la micro placa.	55
Figura 38. Comparación de la homogeneidad de diferentes configuraciones del actuador.	56
Figura 39. Comparación de la velocidad de diferentes configuraciones del actuador.	56
Figura 40. Diagrama de un sistema de adquisición de datos (DAQ). Fuente: [28].	57
Figura 41. Características de los módulos compatibles con el DAQ. Fuente: [24].	57
Figura 42. Conexión de los módulos Agilent 34901A y 34907A en el DAQ.	58
Figura 43. Conexiones físicas en el módulo Agilent 34901A.	58
Figura 44. Detalle de las conexiones físicas en el módulo Agilent 34901A.	58
Figura 45. Conexiones físicas en el módulo Agilent 34907A.	59
Figura 46. Detalle de las conexiones físicas en el módulo Agilent 34907A.	59
Figura 47. Respuesta del sistema cuando calienta.	60
Figura 48. Respuesta del sistema cuando enfría.	60
Figura 49. Respuesta del control PID con los parámetros calculados.	61
Figura 50. Estructura While en LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	62
Figura 51. Estructura For en LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	62
Figura 52. Estructura Case en LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	62
Figura 53. Estructura Flat Sequence en LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	62
Figura 54. Bloques Initialize y Close del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	63
Figura 55. Bloque Conf EZ del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	63
Figura 56. Bloque Conf EZ del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	63
Figura 57. Bloque Digital Output del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	63
Figura 58. Bloque Control PID de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	64
Figura 59. Bloque Wait Until Next ms Multiple de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	64
Figura 60. Bloque Select de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.	64
Figura 61. Detalle del software en LabVIEW donde se ve el PWM en tiempo.	64
Figura 62. Detalle del software en LabVIEW donde se ven las funciones del bloque Select.	65
Figura 63. Panel frontal de LabVIEW que hace de interface de usuario.	67

Lista de Tablas

Tabla 1. Planificación de las tareas realizadas.....	16
Tabla 2. Parámetros de ajuste con el método de oscilación. Fuente: [18].	28
Tabla 3. Parámetros de ajuste con el método basado en la curva de reacción. Fuente: [18].....	28
Tabla 4. Cálculo de la potencia de las celdas Peltier.	30
Tabla 5. Comparación de las características de diversas celdas Peltier comerciales.	31
Tabla 6. Desviación de los termopares usados para medir.	35
Tabla 7. Bits de control para el encendido y modo de las celdas Peltier.	39
Tabla 8. Lista final de componentes usados en el prototipo.	46
Tabla 9. Lista de material adicional usado para la realización del prototipo.	46
Tabla 10. Presupuesto en personal.	47
Tabla 11. Lista de componentes usados en la propuesta de sistema mínimo.....	47
Tabla 12. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP1.	51
Tabla 13. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP2.	51
Tabla 14. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP3.	52
Tabla 15. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP4.	52
Tabla 16. Hitos del proyecto.	52
Tabla 17. Condiciones del test de una celda Peltier sin refrigerador.	53
Tabla 18. Condiciones del test de una celda Peltier con el refrigerador apagado.	53
Tabla 19. Condiciones del test de una celda Peltier con el refrigerador encendido.	54
Tabla 20. Parámetros obtenidos a partir del método basado en la curva de reacción.	61
Tabla 21. Parámetros PID calculados para el modo calentar y para el modo enfriar.	61
Tabla 22. Reglas heurísticas de ajuste de los parámetros PID. Fuente: [29].	61
Tabla 23. Ejemplo del cálculo de la selección del modo en LabVIEW.....	66
Tabla 24. Ejemplo del cálculo para el reinicio del bloque PID de LabVIEW.	66

1. Introducción

A continuación, se explican la motivación y los objetivos de este proyecto, así como el problema a partir del cual surge la idea del mismo. Además, se detallan los requerimientos, las especificaciones y el plan de trabajo seguido para su realización.

1.1. Motivación y objetivos

El propósito de este proyecto es diseñar, implementar y validar un sistema de control para la realización de ciclos térmicos que favorezcan cambios en la adherencia de cultivos de células madre a un sustrato específico para provocar cambios en su diferenciación.

El proyecto se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Instrumentación y Bioingeniería, en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, a partir de una propuesta del grupo de investigación *Molecular Dynamics at Cell Biomaterial Interface* del Instituto de Bioingeniería de Cataluña (de ahora en adelante IBEC), dirigido por el Dr. George Altankov.

Los objetivos académicos que se pretenden alcanzar con la realización de este proyecto son los siguientes:

- Formular y resolver un problema real de ingeniería, usando para ello los conceptos adquiridos a lo largo del grado (fortaleciendo así su entendimiento) y todos los nuevos conceptos que deban ser aprendidos para este proyecto. Asimismo, ser capaz de usar los instrumentos y herramientas requeridos.
- Trabajar y aprender de manera autónoma, pero con la guía del director de la tesis.
- Planificar y administrar el tiempo de manera correcta para conseguir resultados y cumplir los objetivos planteados.
- Identificar las necesidades del usuario final y, en base a ellas, definir las especificaciones y requerimientos del sistema.
- Diseñar e implementar un primer prototipo del producto. Validarlo con el usuario final y desarrollar las modificaciones necesarias.
- Validar si la solución desarrollada cumple con las especificaciones y los requerimientos descritos al principio del proceso. Para ello, obtener resultados conjuntamente con el usuario final para constatar que los objetivos se han cumplido.

1.2. Antecedentes

Este proyecto es una propuesta de mejora de algunos aspectos instrumentales empleados en la tesis de máster desarrollada por Maria Valeska en el IBEC. Dicha tesis [1] está englobada en el proyecto de investigación sobre la creación de nichos dinámicos para células madre con biomateriales sensibles a estímulos [2].

En la tesis [1], se lleva a cabo un estudio sobre los cambios en la adherencia de los cultivos de células madre a un nicho dinámico creado con sustrato PNIPAAm, un polímero termo-responsivo (es decir, un biomaterial dependiente de la temperatura) y sobre la diferenciación de estas células cuando se aplican distintas temperaturas.

El objetivo es ir variando la temperatura del cultivo alrededor del LCST (de las siglas, en inglés, *Lower Critical Solution Temperature*) del sustrato en cuestión, que está situado alrededor de los 32 °C. Entonces, cuando la temperatura del conjunto está por debajo del LCST, se produce la pérdida de adherencia y cuando está por encima, las células se adhieren a dicho sustrato [1]. Dado que las células adheridas tienen forma aplanada y cuando no lo están cuasi esférica, el cambio repetido entre ambos estados tiene efectos sobre la diferenciación de las células.

Para realizar los diferentes ciclos, usan un sistema de control de temperatura que debe ser ajustado manualmente y que además es lento a la hora de alcanzar la temperatura deseada. Dicho sistema (ver Figura 1) está compuesto por una incubadora (fijada a una temperatura de 37 °C, a un 5% de CO₂ y a un 98% de humedad), un intercambiador de calor (que se encuentra en el interior de la incubadora y sobre el cual se colocan las micro placas) basado en una plancha de acero inoxidable con un circuito interno de líquido, un refrigerador con termostato para regular la temperatura del agua que circula por el interior de la plancha y un termómetro digital que mide la temperatura cada 5 minutos [1].



Figura 1. Sistema de control de temperatura actual en el IBEC. **Fuente:** [1].

Tras varios experimentos probando distintas combinaciones entre la temperatura de la incubadora y la temperatura del circuito de agua, decidieron usar el siguiente protocolo:

- **Etapas de enfriamiento:** La incubadora está fijada a 37 °C y la temperatura disminuye hasta 24 °C haciendo circular el agua a 12°C por la plancha de acero inoxidable. La transición de 37 °C a 24 °C equivale a 20 minutos [1].
- **Etapas de calentamiento:** La incubadora está fijada a 37 °C y el circuito de agua está apagado (solamente la incubadora influye en el cambio de temperatura). La transición de 24 °C a 37 °C equivale también a 20 minutos [1].

El sistema tarda 20 minutos en alcanzar la temperatura deseada, tanto en el caso de calentar como en el de enfriar. Así pues, un ciclo completo son como mínimo 40 minutos.

Debido a la lentitud a la hora de configurar manualmente la temperatura del sistema de control y a los elevados tiempos de transición, sólo realizan dos ciclos completos al día. Aun así, han observado un comportamiento diferencial en las células [1].

Estos protocolos pueden ser mejorados mayoritariamente en dos aspectos:

- **Tiempos de conmutación entre temperaturas:** Reduciendo los tiempos de conmutación entre temperaturas, se acortan los tiempos de espera entre experimentos, permitiendo un mayor número de éstos y obteniendo así, resultados más rápidamente.
- **Automatización:** Si el proceso deja de ser dependiente, los resultados pueden ser obtenidos de una manera más cómoda, permitiendo ciclos durante la noche, aportando una mejor calidad de vida al usuario final y pudiendo emplear éste su tiempo en otras tareas desarrolladas en paralelo.

1.3. Requerimientos y especificaciones

Con tal de conocer mejor la instrumentación y los procedimientos con los que se trabaja en el IBEC, se mantuvo una reunión al inicio del proyecto con el Dr. George Altankov, director de la tesis mencionada, y con Laura Ramalho, quien está siguiendo la investigación, para entender mejor sus problemas y necesidades.

Después de la reunión, y siendo informados sobre las limitaciones descritas en el apartado anterior, se extrajeron algunas conclusiones en forma de requerimientos y especificaciones.

Requerimientos

- El producto debe adaptarse al entorno actual, es decir, no se trata de partir de cero sino de adaptar la solución a lo que usan actualmente. El circuito de agua seguirá siendo necesario con tal de extraer el calor sobrante generado por el actuador, manteniendo así un tamaño inferior a otras posibles soluciones como podrían ser ventiladores, que a su vez podrían alterar las condiciones de la incubadora.
- El producto final debe permitir trabajar simultáneamente con cuatro micro placas dentro de la incubadora.
- El producto final debe proporcionar soluciones al incremento y decremento de temperatura en tiempos menores a los que se obtienen actualmente (es decir, menores a 20 minutos) para permitir realizar más de dos ciclos al día. El mínimo periodo no está claro ya que no existen resultados previos con tiempos de conmutación cortos, así que, cuanto menor sea, mejor.
- La temperatura deberá ser adquirida con un sistema de adquisición de datos (DAQ) y monitorizada mediante un software (por ejemplo, LabVIEW) en periodos más cortos (es decir, actualizada más frecuentemente que cada 5 minutos como se hace ahora) con tal de mejorar la respuesta del sistema de control.
- Las temperaturas deben cambiar automáticamente y no deben ser introducidas manualmente cada vez que deban ser cambiadas (tal y como se hace ahora). Sólo se pedirán una vez al iniciar el programa.
- Como extra, y si el tiempo lo permite, el producto final debe proporcionar una manera para permitir observar las células en un microscopio invertido mientras se aplican los cambios térmicos.

Especificaciones

A partir de los requerimientos, se elaboran y consensuan con el usuario final las siguientes especificaciones:

- Temperaturas límite superior e inferior: 37 °C y 24 °C, respectivamente.
- Duración de las transiciones entre temperaturas: Lo más cortas posibles, vendrán determinadas por el intercambio térmico del contenido de los pocillos (que se rellenan con líquido alcanzando 1 centímetro de altura). En ningún caso deben ser mayores a 20 minutos. Una estimación inicial podría estar en el rango de los 2 minutos.
- La incubadora debe poder trabajar con cuatro micro placas simultáneamente. Los módulos y la solución desarrollada en este proyecto deben caber dentro de la incubadora, de dimensiones 40x40x30 centímetros.
- La solución desarrollada en este proyecto debe ser compatible con las micro placas usadas en el IBEC, de dimensiones estándar 12,5x8,3x3 centímetros. La altura total de la solución propuesta no debería exceder los 5 centímetros de altura por si desean usar los estantes de la incubadora y llevar a cabo un mayor número de experimentos.
- Inicialmente, no será necesario controlar la temperatura de la incubadora ni del baño externo, pero podría ser útil saber si éstos poseen algún tipo de link/puerto de comunicación con el cual ser controlados por ordenador.

1.4. Plan de trabajo

El trabajo para la realización de este proyecto se dividió en cuatro bloques (ver Anexo A).

Tal y como se aprecia en la Tabla 1, ha habido modificaciones respecto a lo previsto al inicio del proyecto en cuanto a los tiempos de duración de las tareas.

Estas modificaciones han venido dadas por diversos motivos, entre ellos:

- Tiempos de espera largos en la entrega del material.
- Dado que nunca antes había trabajado con el entorno de programación usado para desarrollar el software, fue necesario un periodo de aprendizaje que no se había contemplado al principio.
- En general, las tareas conllevaron más tiempo de lo esperado, dado que se encontraron varios problemas inesperados durante el desarrollo del prototipo (por ejemplo: instalación de drivers, montaje del refrigerador, etc.). En la explicación del diseño se detallan los imprevistos encontrados.
- Cada paso nuevo realizado ha sido testeado. Para la realización de estos test se ha requerido mucho tiempo con tal de medir la respuesta a largo plazo. Además, se pretendía imitar las condiciones de un test real en el IBEC, donde pretenden que la solución desarrollada esté funcionando durante un largo periodo de tiempo (por ejemplo, durante toda la noche).

A continuación, se adjunta el diagrama de Gantt final del proyecto (ver Figura 2) y la planificación de las tareas de cada bloque, comparando los tiempos previstos inicialmente respecto a los tiempos que finalmente se han seguido (ver Tabla 1).

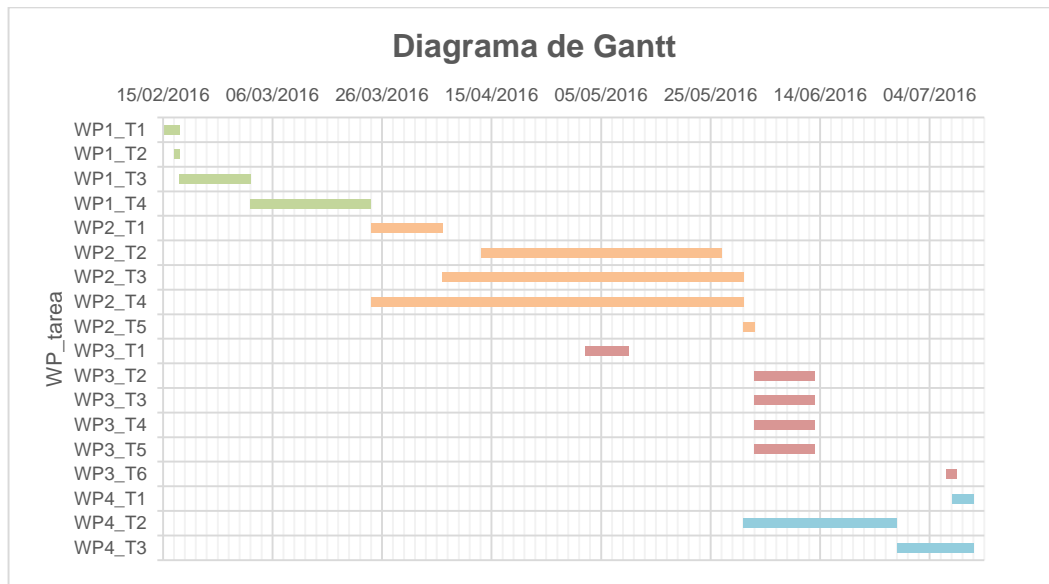


Figura 2. Diagrama de Gantt del proyecto.

WP_Tarea	Descripción	Planificación inicial			Tiempo real		
		Inicio	Fin	Duración (días)	Inicio	Fin	Duración (días)
WP1_T1	Leer tesis M. Valeska	15/02/2016	17/02/2016	3	15/02/2016	17/02/2016	3
WP1_T2	Reunión con IBEC	17/02/2016	17/02/2016	1	17/02/2016	17/02/2016	1
WP1_T3	Documentar (PPWP)	18/02/2016	01/03/2016	13	18/02/2016	01/03/2016	13
WP1_T4	Buscar información	18/02/2016	01/03/2016	13	02/03/2016	23/03/2016	22
WP2_T1	Diseño del actuador	02/03/2016	13/03/2016	12	24/03/2016	05/04/2016	13
WP2_T2	Diseño del hardware	14/03/2016	05/04/2016	23	13/04/2016	26/05/2016	44
WP2_T3	Diseño del software	06/04/2016	25/04/2016	20	06/04/2016	30/05/2016	55
WP2_T4	Tests internos	02/03/2016	26/04/2016	56	24/03/2016	30/05/2016	68
WP2_T5	Test en el IBEC	27/04/2016	01/05/2016	5	31/05/2016	01/06/2016	2
WP3_T1	Documentar (CR)	02/05/2016	09/05/2016	8	02/05/2016	09/05/2016	8
WP3_T2	Modificaciones del actuador	10/05/2016	29/05/2016	20	02/06/2016	12/06/2016	11
WP3_T3	Modificaciones del hardware	10/05/2016	29/05/2016	20	02/06/2016	12/06/2016	11
WP3_T4	Modificaciones del software	10/05/2016	29/05/2016	20	02/06/2016	12/06/2016	11
WP3_T5	Tests internos	10/05/2016	29/05/2016	20	02/06/2016	12/06/2016	11
WP3_T6	Test en el IBEC	30/05/2016	31/05/2016	2	07/07/2016	08/07/2016	2
WP4_T1	Analizar resultados en el IBEC	01/06/2016	13/06/2016	13	08/07/2016	11/07/2016	4
WP4_T2	Documentar (memoria TFG)	01/06/2016	27/06/2016	27	31/05/2016	27/06/2016	28
WP4_T3	Preparar presentación	28/06/2016	11/07/2016	14	28/06/2016	11/07/2016	14

Tabla 1. Planificación de las tareas realizadas.

2. Estado del arte

En esta sección se da una visión general de la investigación en la que se centra este proyecto y para la cual se pretende desarrollar una mejora: la creación de nichos dinámicos para células madre con biomateriales sensibles a estímulos.

Actualmente, los diversos tratamientos con células madre se ven todavía obstaculizados debido al conocimiento insuficiente de las señales que gobiernan el comportamiento de las mismas. Dado que se conoce que es el entorno físico y químico que las rodea (el nicho) el encargado de regular la evolución de las células madre, tiene sentido estudiar las características que debe tener éste para obtener el resultado deseado.

Por ello, en el IBEC están interesados en diseñar nichos de células madre usando biomateriales que imiten en gran medida las interacciones entre célula madre y matriz extracelular natural, estructura donde las células madre están incrustadas y cuya función es mantenerlas en su lugar [1].

Así, los investigadores están interesados en manipular la configuración espacial de los nichos de células madre, pero también en estudiar sus aspectos dinámicos (es decir, temporales). Para ello, usan polímeros sensibles a los estímulos para controlar un entorno artificial al cual se unen las células. Al regular la fuerza de adhesión, intentan controlar el mecanismo de adhesión de las células madre, la cual cosa les permite imitar las condiciones dinámicas del nicho de las células madre [2].

Al tratarse de un estudio pionero, todavía es pronto para extraer conclusiones debido a los pocos experimentos hechos hasta el momento. Para entender bien esta investigación, a continuación, se introducen algunos conceptos relacionados con la ingeniería de tejidos y la biotecnología en general.

2.1. Las células madre y su diferenciación

Las células madre son aquellas células que se encuentran en organismos multicelulares y que tienen la capacidad de dividirse asimétricamente dando lugar a dos células hijas; una de ellas posee las mismas propiedades que la original (auto-renovación) mientras que la otra adquiere la capacidad de poder especializarse (diferenciación) si las condiciones ambientales son las adecuadas [3] [4].

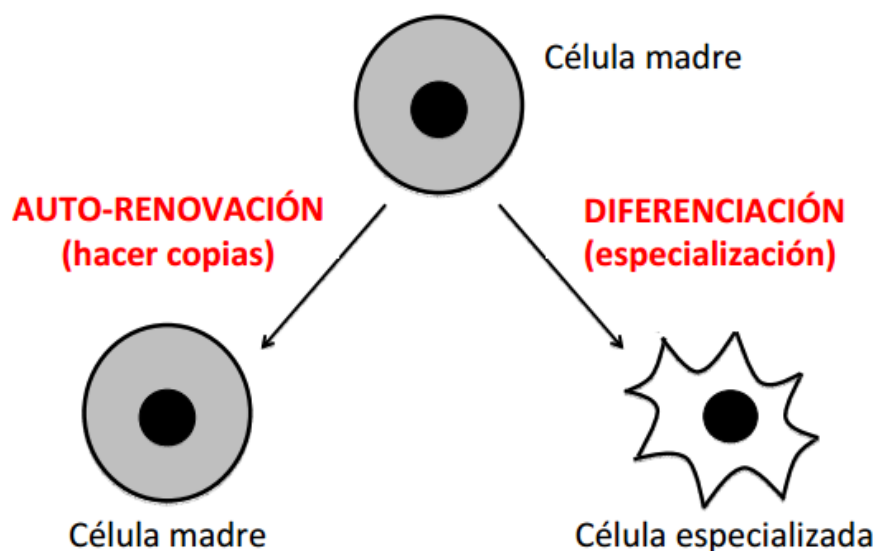


Figura 3. Esquema de la división asimétrica de una célula madre. Fuente: [4].

2.2. Nichos dinámicos con biomateriales sensibles a estímulos

Un nicho es un microambiente celular que proporciona el sustento y los estímulos necesarios para mantener la auto-renovación y diferenciación de células madre [3].

Es importante entender el microambiente que rodea a las células madre para comprender cómo controlarlas en un cultivo [4], ya que es el nicho el que ayuda a regular la cantidad y tipo de las nuevas células a producir [5].

Los nichos también ayudan a mantener un suministro de células madre para ser usadas más tarde. Por ejemplo, dentro del cuerpo humano, hay nichos separados para células madre que llegarán a ser sangre, para células madre que se convertirán en piel, y así sucesivamente [5]. Sin embargo, el nicho no debe ser considerado simplemente una ubicación física de las células madre, sino más bien el lugar donde las señales extrínsecas interactúan y se integran para influir en el comportamiento de las células madre [1].

Así pues, las investigaciones de hoy en día se centran en el estudio del control y la perturbación del ambiente del nicho para posteriormente descubrir cómo estas alteraciones contribuyen en el comportamiento de las células madre.

En la tesis de la que se parte [1], se pretende alterar dinámicamente la adherencia de las células madre con el fin de imitar sus interacciones dinámicas con la matriz extracelular en un nicho artificial.

Para lograrlo, los materiales que podrían cambiar el microambiente del nicho son los polímeros estímulo-responsivos, materiales que sufren cambios radicales en su estructura interna cuando son sometidos a dichos estímulos (temperatura, pH, luz, etc.) y que por lo tanto pueden ser usados como interruptores [1].

En este caso, decidieron apostar por el polímero termo-responsivo PNIPAAm, que ha sido usado ampliamente en el control indirecto de la unión de células y de su adherencia mediante la modificación de la humedad en su superficie a través de cambios sutiles de la temperatura del cultivo. Cuando se altera la temperatura de 37 °C a 24 °C, la conformación de las moléculas del material cambia, de forma que aumenta su grosor y las células y la matriz se liberan juntas de la superficie. Esto sucede porque por debajo del LCST, el polímero se comporta de manera hidrófila, es decir, está altamente hidratado y repele las proteínas y las células. En cambio, cuando está por encima del LCST, se comporta de manera hidrofóbica ya que las moléculas adquieren una forma globular que resulta en la deshidratación provocando una mayor afinidad por las proteínas y las células [1]. Así, tiene sentido lo ya mencionado anteriormente: cuando la temperatura es inferior al LCST (que para este material se corresponde con 32 °C), se produce la pérdida de adherencia. De lo contrario, las células permanecen adheridas al polímero.

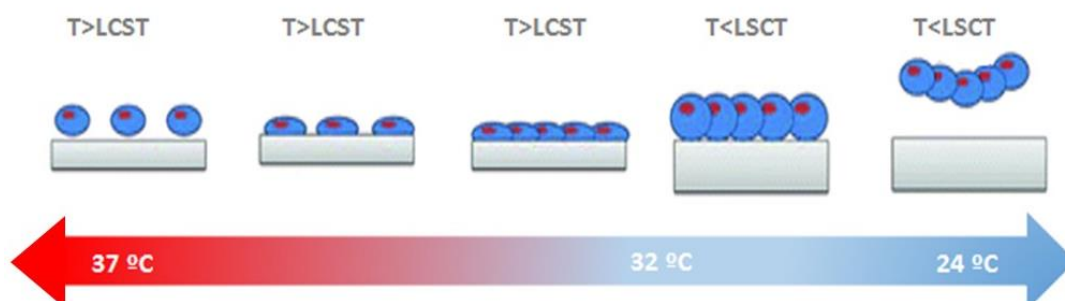


Figura 4. Condiciones de adherencia según la temperatura. **Fuente:** [6] (modificada).

3. Fundamentos teóricos

Para entender el diseño de la solución final, se introducen primero los principios teóricos tenidos en cuenta. Desde el primer momento se tuvo claro que, por el entorno de trabajo y por la cantidad de energía necesaria, el actuador debía ser de tipo termoelectrico. Por ello, a continuación, se describen varios conceptos relacionados con la termoelectricidad, los sistemas térmicos, los sensores de temperatura y los sistemas de control.

3.1. Principios de termoelectricidad

La termoelectricidad es el estudio de la relación que surge entre la corriente eléctrica y el flujo de calor en un material. Esta rama de la ciencia estudia los efectos relativos a la generación de calor en la unión de dos conductores de distinto material cuando en ellos se aplica una corriente eléctrica. Asimismo, también estudia el efecto contrario, es decir, la generación de una corriente eléctrica cuando esta unión se somete a un gradiente de temperatura.

Aunque los módulos termoelectricos comerciales empezaron a estar disponibles a partir del 1960, los principios físicos en los que se basan habían sido descubiertos un siglo antes. Los fundamentos teóricos en los cuales se basa la termoelectricidad son principalmente tres: el efecto Peltier, el efecto Seebeck y el efecto Thomson.

3.1.1. Efecto Seebeck

El primer descubrimiento importante relacionado con la termoelectricidad ocurrió en 1821, cuando el físico Thomas Seebeck observó que, en un circuito formado por dos metales homogéneos distintos, A y B , cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas, T y $T + \Delta T$, aparece entre ambos un flujo de corriente eléctrica J , o bien, si se abre el circuito, una fuerza termo electromotriz (*f.t.e.m.*) E_{AB} , que depende de la naturaleza de los metales utilizados en la unión y de la diferencia de temperatura entre las uniones [7] [8].

La relación entre la *f.t.e.m.* E_{AB} , y la diferencia de temperatura entre las uniones ΔT , define el coeficiente Seebeck:

$$\alpha_{AB} = \frac{\partial E_{AB}}{\partial T} = \alpha_A - \alpha_B \quad (1)$$

donde α_A y α_B son respectivamente las potencias termoelectricas absolutas de A y B y son características de cada material [8].

En la Figura 5, puede observarse el esquema del funcionamiento del Efecto Seebeck. Un ejemplo de dispositivo que se aprovecha de este efecto es el termopar.

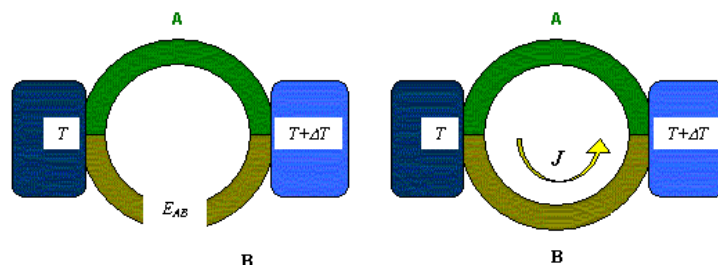


Figura 5. Efecto Seebeck en circuito abierto (izqda.) y en circuito cerrado (dcha.). Fuente: [9].

3.1.2. Efecto Peltier

El efecto Peltier, descubierto el año 1834 por Jean Charles Peltier, consiste en el efecto contrario al de Seebeck. Es decir, este físico francés observó que, haciendo pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, se obtenía que una de sus uniones absorbía el calor y la otra lo cedía. El efecto Peltier depende exclusivamente de la composición y temperatura de la unión. La potencia calorífica intercambiada en la unión entre A y B es:

$$\dot{Q} = J \cdot \pi_{AB} = J \cdot \Delta T \cdot (\alpha_A - \alpha_B) = J \cdot \Delta T \cdot \alpha_{AB} \quad (2)$$

donde π_{AB} es el coeficiente Peltier, J es el flujo de corriente eléctrica, ΔT la diferencia de temperatura absoluta entre los materiales A y B y α_{AB} el coeficiente de Seebeck [8].

En la Figura 6, puede observarse el esquema de funcionamiento del efecto Peltier. Un ejemplo de dispositivo que se aprovecha de este efecto es la celda Peltier.

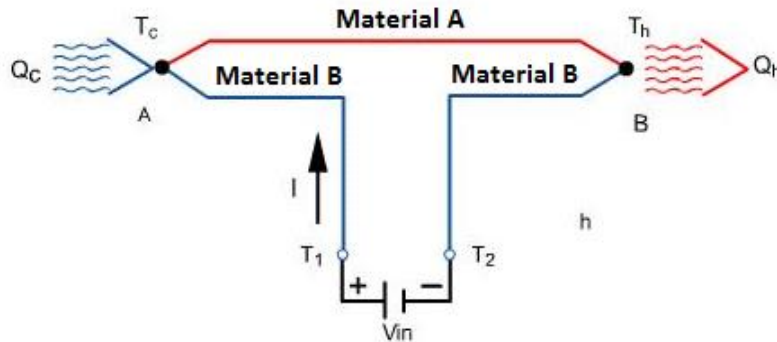


Figura 6. Efecto Peltier entre los materiales A y B. Fuente: [8] (modificada).

El coeficiente Peltier puede ser positivo o negativo según la relación entre los materiales. Una consecuencia interesante de este efecto es que la dirección de transferencia de calor puede coincidir o no con la dirección de la corriente [7], tal como se ve en la Figura 7.

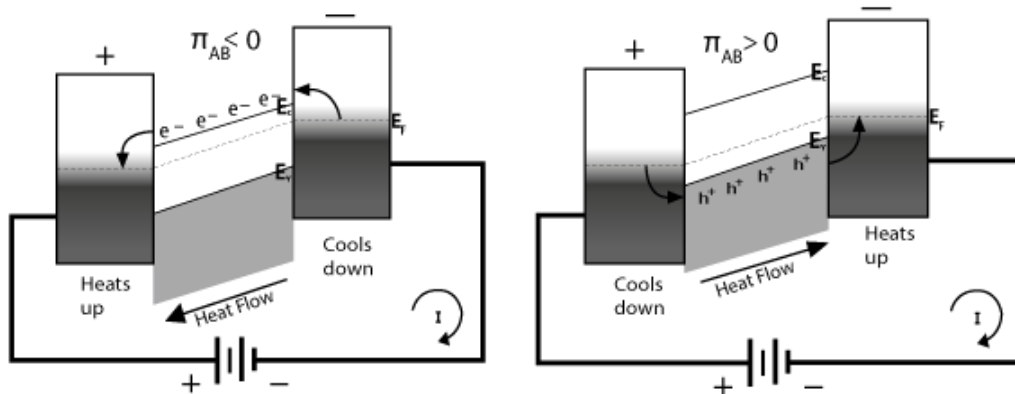


Figura 7. Comportamiento según el signo del coeficiente Peltier. Fuente: [7].

En cualquier caso, invirtiendo la polaridad de la corriente aplicada, se puede cambiar el signo de la potencia calorífica (ecuación (2)) y por tanto la dirección de transferencia de la temperatura. Es decir, según la polaridad, la misma cara de la celda enfría o calienta.

3.1.3. Efecto Joule

El efecto Joule, descubierto por James Joule en 1841, caracteriza la interacción entre un fenómeno eléctrico (la conducción de corriente eléctrica) y un fenómeno térmico (el calentamiento del conductor por el cual circula la corriente). La materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, provocando que éstos cedan energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor como:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (3)$$

donde Q es la energía calorífica producida por la corriente, I es la intensidad de la corriente que circula, R la resistencia eléctrica del conductor y t el tiempo [8].

3.1.4. Efecto Thomson

William Thomson (también conocido como Lord Kelvin), describió la relación entre el efecto Seebeck y el efecto Peltier. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor con un gradiente de temperatura a lo largo de su longitud, el calor será o bien absorbido por el conductor o bien expulsado por el mismo. Esto se expresa:

$$q = I^2 \cdot R - \mu \cdot J \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

donde el primer término de la diferencia se corresponde con el efecto Joule, la μ es el coeficiente Thomson y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de la temperatura a lo largo del material.

De la expresión (4) se deduce que la condición para que el calor sea absorbido o expulsado depende tanto de la dirección de la corriente como de la dirección del gradiente de temperatura. Suponiendo que el extremo caliente es el que tiene mayor potencial, cuando la corriente se mueve del extremo caliente al extremo frío (y por tanto de un mayor a un menor potencial), se produce calor. En cambio, cuando la corriente se mueve de un potencial bajo a un potencial mayor, hay absorción de calor, y por tanto enfriamiento. Este fenómeno es conocido como el Efecto Thomson [8] [9].

3.1.5. Ley de Fourier

Por último, existe un trabajo interno que se debe a la conducción térmica determinada por la ley de Fourier. Ésta establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. Por tanto, el calor que fluye del foco más caliente al frío por unidad de tiempo para cada elemento es:

$$\dot{Q} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{l} \quad (5)$$

donde k es el coeficiente de conductividad térmica de cada elemento por unidad de longitud a través de la unidad de sección, A es la sección normal a la dirección del flujo, l la longitud de cada elemento y ΔT la diferencia de temperatura en los extremos del elemento [8].

3.2. Sistemas térmicos

Existen otros sistemas térmicos además de los dispositivos termoelectricos que pueden producir o absorber calor usando los principios detallados anteriormente u otros. Los más comunes son las celdas Peltier, las resistencias térmicas, el TTB, la refrigeración por compresión y expansión de un gas y la refrigeración por líquido.

3.2.1. Celdas Peltier

Las celdas Peltier son dispositivos termoelectricos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente eléctrica [10].

Las celdas Peltier están compuestas por dos placas de cerámica separadas por cubos de material semiconductor. Éstos están intercalados según si son de tipo P o de tipo N, y se encuentran conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Las placas azules y rojas de la Figura 8 son los puentes eléctricos, conductores de cobre o de algún material conductor eléctrico, encargados de unir los semiconductores de ambos tipos [10].

Como se observa en la Figura 8, las uniones N-P se realizan en la cara superior mientras que las P-N se realizan en la inferior, de tal forma que todos los semiconductores que absorben el calor están conectados a un lado de la placa y los que lo desprenden al otro. Estas uniones se conectan a los cables positivo y negativo, quedando todos los termoelementos de la célula en serie. Finalmente, las placas de cerámica sirven como soporte mecánico de la estructura del dispositivo y como aislante eléctrico entre los elementos de la célula y la superficie de montaje externa [10].



Figura 8. Estructura interna de una celda Peltier. Fuente: [10].

Cuando se conecta al módulo termoelectrico una corriente continua, el calor se transmite a través del dispositivo desde una cara hasta la otra. El calor existente en una de las caras (cara fría) se extrae y es conducido a la otra cara (cara caliente). Por tanto, la temperatura de una de las caras disminuye mientras la temperatura de la otra cara aumenta. Como se ha comentado anteriormente, este efecto es reversible, es decir, cambiando el sentido de la corriente eléctrica aplicada (invirtiendo su polaridad), la cara que antes era fría será la caliente y viceversa, pudiéndose utilizar tanto para calentar como para enfriar [10].

Al conectar una corriente continua a una celda Peltier, la potencia que se absorbe contiene un término debido al efecto Peltier y otro debido al efecto Joule. La ley de Fourier no se tiene en cuenta al ser un trabajo interno. Entonces, de las ecuaciones (2) y (3), se extrae:

$$P_{in} = \dot{Q} + Q = J \cdot \Delta T \cdot \alpha_{AB} + I^2 \cdot R \quad (6)$$

donde P_{in} es la potencia suministrada por la fuente [8].

3.2.2. Otros sistemas térmicos

Aunque desde el principio se tuvo claro que se usarían celdas Peltier, se tuvieron en cuenta otras posibilidades a la hora de elegir el diseño del actuador del sistema de control. A continuación, se da una breve explicación de cada alternativa, aunque la justificación de la elección se detalla en el apartado de diseño.

- **Resistencias térmicas:** Son elementos calefactores tubulares de distintas formas, longitudes y potencias. Su uso es solo para calentar.
- **Tubo termosifón bifásico (TTB):** También conocido como caloducto o por su nombre en inglés, *heat pipe*, este sistema consiste en un tubo con alta conductividad y de baja presión que se usa para disipar calor. Esto se consigue porque en su interior contiene un líquido que se evapora al absorber calor y se licua al cederlo en el otro extremo del dispositivo [11].
- **Refrigeración por compresión y expansión de un gas:** Es el sistema actualmente usado en las neveras convencionales. Transportan el calor de su interior hacia el exterior mediante la circulación de un refrigerante por un circuito cerrado con dos zonas diferenciadas: la de alta presión (en el exterior) y la de baja presión (en el interior). El refrigerante cambia su condición de líquido a gas y viceversa para conseguir el efecto deseado [12].
- **Refrigeración por líquido:** Consiste en extraer el calor haciendo pasar un líquido (como por ejemplo agua) por un circuito normalmente cerrado donde se controla la temperatura del líquido en algún punto con tal de ir manteniendo la temperatura estable. Es una opción lenta y costosa comparada con otras.

3.3. Sensores de temperatura

Tanto para llevar a cabo la caracterización como el control del sistema, será necesario medir la temperatura en varios puntos. Existen distintos dispositivos capaces de medir la temperatura. Entre los más comunes están los termopares, los termistores y los RTD.

3.3.1. Termopares

Los termopares están formados por dos hilos de metales distintos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura.

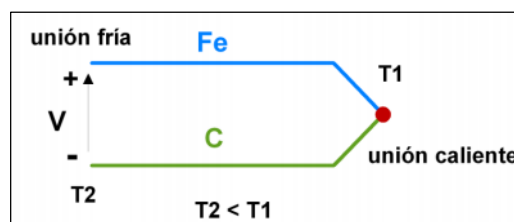


Figura 9. Estructura de un termopar de Fe-C. Fuente: [13].

Esta configuración permite el efecto termoeléctrico, es decir, la conversión de energía térmica en energía eléctrica, obteniendo una *f.t.e.m.*:

$$E_{AB} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T = \alpha_{AB} \cdot (T_1 - T_2) \quad (7)$$

donde E_{AB} es la *f.t.e.m.* que aparece en el extremo abierto, T_1 y T_2 son las temperaturas en las uniones y α_{AB} es el coeficiente de Seebeck [14].

Para entender bien el funcionamiento de los termopares, existen tres leyes empíricas de los circuitos termoeléctricos:

- **Ley de los materiales homogéneos:** En un conductor metálico homogéneo no se genera corriente termoeléctrica al aplicarle calor. Esto se traduce en:
 - Hacen falta dos metales diferentes para formar un termopar.
 - Si un metal sometido a un gradiente de temperatura genera una *f.t.e.m.*, entonces se trata de un metal no homogéneo.
- **Ley de los materiales intermedios:** Si todo el circuito está a una misma temperatura, entonces la suma algebraica de las tensiones termoeléctricas en un circuito compuesto por número cualquiera de metales distintos es cero. Así:
 - Se puede añadir un tercer metal (conexión al instrumento de medida) en un circuito termoeléctrico sin que éste varíe la tensión, siempre y cuando las dos nuevas uniones estén a la misma temperatura.
 - El método empleado para unir los dos metales (soldadura, con tornillo, etc.) no afecta a la *f.t.e.m.* resultante siempre que el conjunto se encuentre a la misma temperatura y el contacto eléctrico sea correcto.
- **Ley de las temperaturas intermedias:** Si dos metales homogéneos diferentes producen una *f.t.e.m.* E_1 cuando están a temperaturas T_1 y T_2 , y una *f.t.e.m.* E_2 cuando están a temperaturas T_2 y T_3 , la *f.t.e.m.* generada cuando las uniones estén a temperaturas T_1 y T_3 será $E_3 = E_1 + E_2$. De esto se extrae:
 - Si se conoce la *f.t.e.m.* que genera la unión de dos metales distintos con un tercero, la *f.t.e.m.* que genera la unión de los dos primeros es igual a la suma algebraica de las *f.t.e.m.* que genera cada uno con el tercero.
 - Un termopar calibrado para una temperatura de referencia puede ser empleado para otra temperatura mediante la oportuna corrección.

Sabiendo esto, hay que destacar que, para medir la temperatura, y por tanto la *f.t.e.m.*, es necesario conectar el termopar a un voltímetro, creando una nueva unión termoeléctrica. Por tanto, para deducir la temperatura de una unión mediante la tensión termoeléctrica, hay que tener la otra unión a una temperatura conocida o de referencia [14].

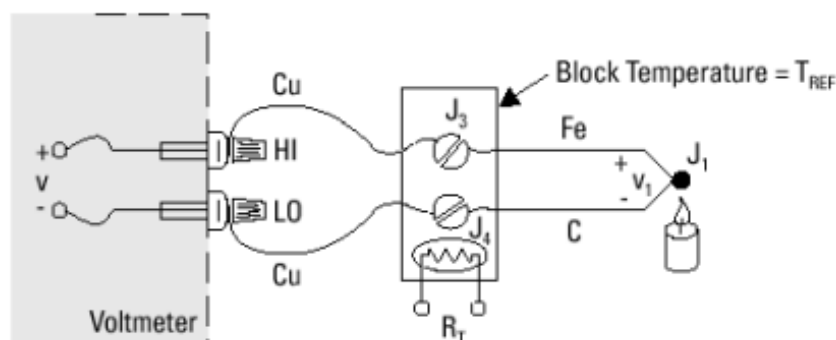


Figura 10. Termopar de Fe-C unido a un bloque isotérmico. Fuente: [15].

Entonces, conectando un bloque isotérmico a la temperatura T_{ref} , a partir de la ecuación (7), se extrae la temperatura a medir:

$$T_1 = \frac{E_{AB}}{\alpha_{AB}} + T_{ref} \quad (8)$$

3.3.2. Otros sensores de temperatura

Se tuvieron en cuenta otras posibilidades a la hora de elegir el sensor de temperatura para realimentar y calibrar el sistema de control. A continuación, se da una breve explicación de cada alternativa, aunque la justificación de la elección se detalla en el apartado de diseño.

- **Termistores:** Están basados en la variación de la resistencia de los semiconductores en función de la temperatura. Existen los termistores tipo NTC y tipo PTC. Los primeros, al aumentar la temperatura, disminuye la resistencia. Sin embargo, en los segundos, si la temperatura aumenta, la resistencia también. No tienen un comportamiento lineal, por tanto, no es trivial calibrarlos [16].
- **RTD (Resistance Temperature Detector):** Están basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Al calentarse el metal, se produce una mayor agitación térmica lo que se traduce en un aumento de su resistencia. Al aumentar la temperatura, aumentará la resistencia. Al ser lineales son más fáciles de calibrar, pero son caros y más voluminosos que los anteriores [16].

3.4. Sistemas de control

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que generan señales de salida en función del valor a la entrada [17].

Para caracterizar el sistema, no es necesario conocer el funcionamiento interno o cómo interactúan los diversos elementos que lo forman, sino que es suficiente con conocer la relación que existe entre su entrada y su salida. Esto se conoce como modelo de caja negra. Así, el aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada ya que un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla o ajustar el sistema para lograr el objetivo final [17].

Entonces, se puede definir un sistema de control como el conjunto de elementos que, mediante una acción de control, interactúan para conseguir la salida deseada [17].

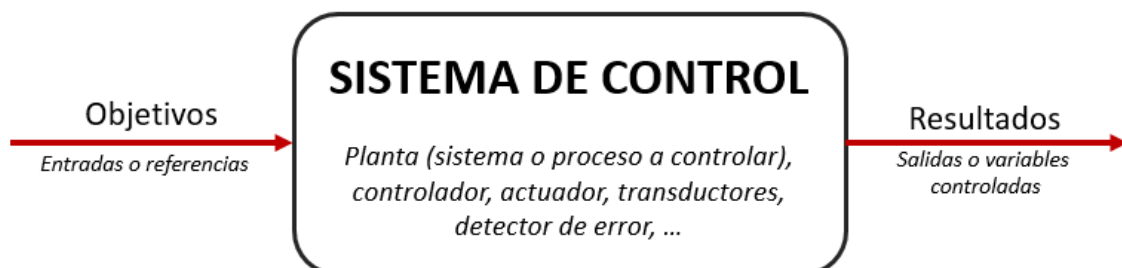


Figura 11. Diagrama de un sistema de control.

Particularidades del sistema para este proyecto:

- Es un sistema de control que trata con señales analógicas (la temperatura), es decir, que varían en tiempo y en amplitud de manera continua.
- Es un sistema en lazo cerrado, ya que la señal de salida sirve para realimentar el control, es decir que tiene efecto sobre la acción del control. Esto se consigue comparando la señal de salida con una referencia (la consigna que pretende alcanzarse). Con la señal de error, que consiste en la diferencia entre ambas, se ajusta el control.

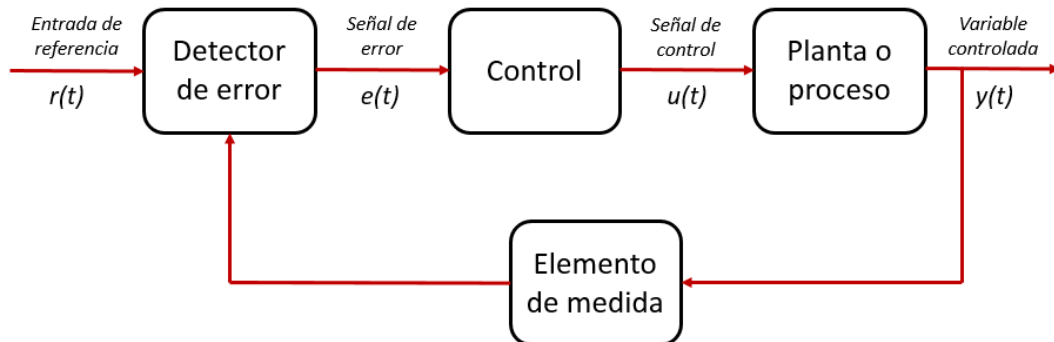


Figura 12. Diagrama de un sistema de control en lazo cerrado.

3.4.1. Control PID

Existen varios tipos de sistemas de control, el que se usa en este proyecto es el PID, que incluye tres acciones de control: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Para entender el efecto de cada una, primero se estudian por separado.

- **P:** La **acción de control proporcional** genera una señal de control que es proporcional al error. Cuanto mayor es la ganancia de control proporcional, mayor es la señal de control generada para un mismo valor de error. Por tanto, el aumento de K_p permite reducir el error en estado estacionario. Sin embargo, esta acción de control no permite eliminarlo [17]. Se caracteriza:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad C_p(s) = K_p \quad (9)$$

donde K_p es la ganancia de control proporcional.

- **D:** La **acción de control derivativa** genera una señal de control proporcional a la derivada del error. Así, el control derivativo conoce las características dinámicas del error (crecimiento o decrecimiento), produciendo una corrección antes de que la señal de error sea excesiva. Esto añade sensibilidad al sistema. Sin embargo, no puede usarse en solitario ya que es incapaz de responder a una señal de error constante, ya que su derivada daría cero, y porque de usarse sin otros controles, el sistema nunca alcanzaría el estado estacionario [17] [18]. Se caracteriza:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad C_p(s) = K_d \cdot s \quad (10)$$

donde K_d es la ganancia derivativa, que se puede expresar también en función de la ganancia proporcional como: $K_d = K_p \cdot T_d$, donde T_d es el tiempo derivativo, encargado de ajustar la acción derivativa.

- **I:** La **acción de control integral** genera una señal de control proporcional al error acumulado, es decir, a la integral del error, lo que implica que es un modo de control lento. La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que, aunque la referencia no sea constante, o cuando aparecen perturbaciones monótonas, el error en estado estacionario es cero [13] [14]. Se caracteriza:

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

donde K_i es la ganancia integral, que se puede expresar también en función de la ganancia proporcional como: $K_i = \frac{K_P}{T_i}$, donde T_i es el tiempo integral, encargado de ajustar la acción integral.

- **PD:** La **acción de control proporcional-derivativa** es la combinación de las acciones proporcional y derivativa. Las acciones se suman en tiempo, quedando:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad C_{PD}(s) = K_P \cdot (1 + T_d \cdot s) \quad (12)$$

Proporciona al sistema una mayor estabilidad que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobre impulso. Sin embargo, cuando la influencia del control es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta [17] [18].

- **PI:** La **acción de control proporcional-integral** es la combinación de las acciones proporcional e integral. Las acciones se suman en tiempo, quedando:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad C_{PI}(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (13)$$

Con esta combinación, la acción integral elimina el error estacionario, mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que conlleva la introducción de la propia acción integral [17] [18].

- **PID:** La **acción de control proporcional-integral-derivativa** es la combinación de las acciones proporcional, derivativa e integral. Las acciones se suman en tiempo, quedando:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_P \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Entonces, aplicando la transformada de Laplace, se obtiene:

$$C_{PID}(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) \quad (15)$$

Ajustando las constantes de cada control, permite combinar las ventajas de las tres acciones, permitiendo eliminar el error en estado estacionario y obteniendo respuestas más rápidas o más lentas y con mayor o menor sobre impulso, según se desee.

3.4.2. Métodos de caracterización y diseño de un sistema de control

Con tal de encontrar los valores de K_p , T_i y T_d idóneos para el sistema de control que se pretende diseñar, existen varios métodos de ajuste.

Los más típicos son el método de oscilación (o método de respuesta en frecuencia) y el método basado en la curva reacción (o método de respuesta al escalón), ambos propuestos por Ziegler y Nichols en 1942 [18].

- **Método de oscilación:** Este procedimiento es válido sólo para plantas estables en lazo abierto. Para calcular las constantes, se usa sólo el control proporcional y, empezando con un valor de ganancia pequeño, se incrementa hasta que la salida del controlador empieza a oscilar. En ese momento, la ganancia con la cual el sistema empieza a oscilar será la ganancia crítica K_c y el periodo de las oscilaciones producidas será T_c . Entonces, se calculan las constantes del PID:

	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 \cdot K_c$		
PI	$0.45 \cdot K_c$	$\frac{T_c}{1.2}$	
PID	$0.6 \cdot K_c$	$0.5 \cdot T_c$	$\frac{T_c}{8}$

Tabla 2. Parámetros de ajuste con el método de oscilación. Fuente: [18].

- **Método basado en la curva de reacción:** Con la planta en lazo abierto, dejar que ésta opere con normalidad, aplicando un escalón (ON-OFF) en el tiempo inicial. Cuando la salida de la planta se estabiliza (ver Figura 13) se pueden extraer una serie de variables con las que más tarde se calculan los parámetros del PID siguiendo la Tabla 3.

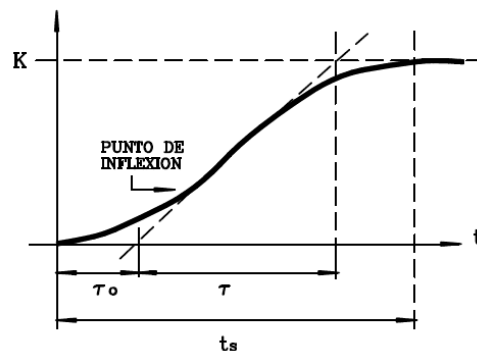


Figura 13. Respuesta de la planta con el método basado en la curva de reacción. Fuente: [17].

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{K \cdot \tau_0}$		
PI	$0.9 \cdot \frac{\tau}{K \cdot \tau_0}$	$3 \cdot \tau_0$	
PID	$1.2 \cdot \frac{\tau}{K \cdot \tau_0}$	$2 \cdot \tau_0$	$0.5 \cdot \tau_0$

Tabla 3. Parámetros de ajuste con el método basado en la curva de reacción. Fuente: [18].

4. Metodología y desarrollo del proyecto

En esta sección se detallan los procedimientos seguidos a la hora de diseñar e implementar la solución desarrollada. Primero, se explica el diseño físico del actuador y su caracterización final. A continuación, se explican el diseño e implementación del control, tanto a nivel software como a nivel hardware. Finalmente, se propone una alternativa al diseño desarrollado a modo de sistema mínimo.

4.1. Consideraciones prácticas

Tal y como se ha explicado anteriormente, la aplicación desarrollada debe adaptarse al sistema con el que el IBEC trabaja actualmente. Por ello, se deben de tener en cuenta algunas consideraciones:

- El actuador se situará dentro de la incubadora, de tamaño ya descrito y fijada a un porcentaje concreto de CO₂ y humedad. Así, la aplicación desarrollada debe ser adecuada en tamaño y no modificar las condiciones del entorno.
- Ligado con lo anterior, con tal de tomar medidas para poder realimentar el control, el sensor usado debe de ser práctico y de tamaño acorde. Se puede sacrificar un pocillo de la micro placa (dejándolo vacío, es decir, sin células) para medir la temperatura de todos los demás, siempre que el sistema cumpla que hay homogeneidad en la temperatura de toda la micro placa.
- La aplicación desarrollada debe ser práctica y reusable. Las micro placas son de un solo uso y, además, después del experimento son observadas a través de un microscopio invertido, microscopio cuya estructura está invertida respecto a un microscopio convencional; su fuente de luz está encima y se observan las células desde abajo. Por ello, el sistema no puede ir acoplado debajo de la micro placa de manera permanente, sino que debe ser removible.
- Todo lo que no sea estrictamente necesario ni tenga que estar en contacto o monitorizando la temperatura de las micro placas, irá en el exterior de la incubadora. Así, el hardware contará con cables largos para mayor comodidad.

4.2. Diseño físico del actuador

Para la construcción del actuador se escogieron las celdas Peltier por las múltiples ventajas que aportaban en cuanto a comportamiento y tamaño frente a las demás opciones contempladas. Se descartaron las demás opciones por los siguientes motivos:

- La **resistencia térmica** se descartó porque para enfriar el cultivo tiene una respuesta más lenta que la celda Peltier, ya que hay que esperar a que ésta se enfríe de manera natural. En cambio, en las celdas Peltier se puede forzar una respuesta más rápida invirtiendo la polaridad de la corriente eléctrica de entrada.
- El **tubo termosifón bifásico** se descartó porque funciona sólo en una dirección (no es reversible) además de resultar costoso, ya que se fabrican en función de la aplicación. Suelen incorporar un ventilador, elemento que podría alterar las condiciones de la incubadora a no ser que se llevase hasta su exterior.
- La **refrigeración por compresión** es complicada de manipular al requerir un circuito de gas. Esto podría alterar las condiciones de la incubadora, además de tener como inconveniente su tamaño. Tendría sentido si hiciese falta extraer o aportar grandes cantidades de calor.
- La **refrigeración por líquido** ya se usa (mediante la plancha de aluminio que poseen en el IBEC) pero es una opción demasiado lenta ya que hay que cambiar la temperatura de todo el contenido del baño termostatado externo.

Una vez escogido el dispositivo termoelectrico, se procedió a dimensionar el sistema. La primera cuestión planteada fue la potencia que debían tener las celdas Peltier. Para averiguarlo, se hicieron unos cálculos basados en la cantidad de líquido a calentar y enfriar.

Se tomaron como referencia las micro placas con 48, 24, 12 y 6 pocillos y sus medidas estándar según [19]. Con una hoja de Excel se hizo el cálculo de la potencia necesaria para cada caso.

Primero se calculó el volumen de líquido a enfriar o calentar usando la fórmula del volumen de un cilindro (ver ecuación 16). Aproximando la densidad del líquido en cuestión a la del agua (equivalente a 1 g/cm³), el volumen calculado será el mismo tanto en gramos como en centímetros cúbicos o mililitros.

$$V_{\text{liquido}} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (16)$$

donde V_{liquido} es el volumen de líquido a enfriar o calentar, r el radio del pocillo y h la altura que alcanza el líquido al rellenar el pocillo (que equivale a 1 centímetro).

A continuación, se calculó la energía necesaria:

$$E[\text{cal}] = V_{\text{liquido}}[l] \cdot Q \left[\frac{\text{cal}}{l \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot \Delta T[^\circ\text{C}] \quad (17)$$

donde E es la energía necesaria para enfriar o calentar (expresada en calorías), Q es el calor específico del agua (que equivale a 1000 $\frac{\text{cal}}{l \cdot ^\circ\text{C}}$) y ΔT la diferencia de temperatura en la conversión (que son 37 – 24 = 13 °C).

Esta energía se puede convertir a Julios con el factor de conversión siguiente:

$$E[J] = E[\text{cal}] \cdot 4.184 \frac{J}{\text{cal}} \quad (18)$$

Finalmente, se calcula la potencia necesaria. Para ello, se tiene que hacer una estimación del tiempo de conversión, Δt , en segundos. Tal y como se comentó en las especificaciones, se hace una primera estimación de 2 minutos. Entonces:

$$P[W] = \frac{E[J]}{\Delta t[s]} = \frac{E[J]}{120} \quad (19)$$

Se concluye, que tal como muestra la Tabla 4, el caso más restrictivo es el de los 6 pocillos. Suponiendo un rendimiento del 50% para las celdas Peltier comerciales, interesan aquellas con potencias alrededor de 9 W.

Número de pocillos	Diámetro pocillo (cm)	Radio pocillo (cm)	Profundidad pocillo (cm)	Altura líquido (cm)	Volumen líquido (cm ³ = ml = g*)	Volumen líquido (litros)	Energía (cal)	Energía (J)	Potencia(W)	Potencia real** (W)
48	0.98	0.49	1.8	1	0.754296396	0.000754296	9.80585315	41.02768958	0.341897413	0.683794826
24	1.55	0.775	1.8	1	1.886919088	0.001886919	24.52994814	102.633303	0.855277525	1.71055505
12	2.2	1.1	1.8	1	3.801327111	0.003801327	49.41725244	206.7617842	1.723014868	3.446029737
6	3.5	1.75	1.8	1	9.621127502	0.009621128	125.0746575	523.3123671	4.360936392	8.721872784

*Suponemos la densidad del agua: D = 1 g/cm³ (1g = 1 cm³ aprox.)

Calor específico del agua [cal/l·°C]:	1000
Diferencia temperatura conversión [°C]:	13
Tiempo conversión [s]:	120

Factores de conversión
1 cal = 4,184 J

**Suponiendo un rendimiento del 50%, se necesita el doble de potencia

Tabla 4. Cálculo de la potencia de las celdas Peltier.

Además de tener en cuenta la potencia, se tuvo muy presente el tamaño de las micro placas para que las celdas Peltier pudieran ajustarse debajo. Así, no se podían sobrepasar los 125 milímetros de longitud, ni los 83 milímetros de ancho. Además, se puso como condición no restrictiva no sobrepasar los 30 milímetros de alto.

Se procedió a buscar celdas Peltier comerciales (ver Tabla 5) que encajaran tanto en potencia como en tamaño. Se vio que las celdas Peltier se fabrican normalmente cuadradas así que, por si debía cubrirse toda la base de la micro placa, tenía sentido comprar 6 celdas de 40x40 milímetros para formar una matriz 2x3, con lo que se cubrirían 80 milímetros de ancho y 120 de largo. Finalmente, se optó por el modelo APH-161-12-14-E de Adaptive con datasheet [20].

Nombre del producto	Fabricante	Potencia (W)	Dimensiones (mm)			Precio
			Longitud	Anchura	Altura	
--	--	> 9	< 125	< 83	< 30	--
ET-161-12-14-E	Adaptive	62.30	40	40	3.7	40 €
GM250-127-14-10	Adaptive	11.60	40	40	3.4	41 €
APH-161-12-18-E	Adaptive	43.80	40	40	4.2	30 €
APH-161-12-16-E	Adaptive	49.20	40	40	3.9	29 €
APH-161-12-14-E	Adaptive	56.30	40	40	3.7	28 €
CP85438	CUI	75.00	40	40	3.8	18 €
CP60440	CUI	53.00	40	40	4	18 €

Tabla 5. Comparación de las características de diversas celdas Peltier comerciales.

Tras varios experimentos con una Peltier sola, se vio que, después de un tiempo de haber alcanzado el límite superior (37 °C), cuando se invertía la polaridad para enfriar, llegaba un punto en el que la celda Peltier ya no era capaz de bajar hasta el límite inferior (24 °C). Esto ocurría porque la celda Peltier no era capaz de extraer el calor generado (ver Anexo B). La mejor solución para ello era incorporar un refrigerador líquido, imitando así las condiciones con las que ya cuentan en el IBEC. Se descartó la solución habitual de radiador más ventilador porque no es compatible con la incubadora. Se realizó otra búsqueda de componentes y finalmente se optó por usar el modelo 416601U00000G de 4 pases de Aavid Thermalloy con datasheet [21]. Se trata de una plancha de aluminio plana de 127 milímetros de ancho y 305 de largo por la que pasa un tubo de cobre. En las pruebas preliminares, las salidas del refrigerador se conectan a unos tubos de plástico, uno de ellos conectado a un grifo y el otro colocado dentro de un bidón donde ir expulsando el agua, con el único objetivo de extraer el calor sobrante. Sin embargo, en la realidad se conectarán al baño termostático del IBEC para extraer el calor sobrante al exterior de la incubadora.

Además, se comparó la temperatura midiendo directamente la superficie de la Peltier y midiendo el fondo de los pocillos de la micro placa. Se observó que los tiempos alcanzados para un mismo gradiente de temperatura eran muy distintos (ver Anexo B). Esto ocurría porque el acoplo térmico no era bueno porque ambas superficies en contacto (la celda Peltier y la base de la micro placa) son muy planas y se crean huecos entre ellas en los que no se está haciendo una buena transferencia de calor. Además, las micro placas presentan algunas aristas en los bordes que pueden dar lugar a huecos indeseados. Se decidió entonces agregar algunas capas entre la celda Peltier y la micro placa. Se probaron los siguientes materiales:

- Se pensó en un material blando, que se adaptase a las superficies para rellenar los huecos entre ambas. Se eligió la almohadilla 467MP con adhesivo 200MP de 3M™ con ficha técnica [22] que conduce la temperatura de manera eficaz y además con su adhesivo puede fijar la posición de las celdas Peltier.

- Para poder garantizar la reusabilidad del prototipo, se pensó en un material no adhesivo, pero igualmente con capacidad de transferir la temperatura. Así, se optó por la lámina de tejido de grafito, concretamente en el modelo GCS-070-G de Global Component Sourcing con ficha técnica [23].
- Como otra posibilidad, se pensó en una placa de aluminio. Así, se compró el material y se cortó y lijó con las medidas de la base de la micro placa.
- También se pensó en usar agua, para lo que se usó una esponja mojada (tejido de bayeta humedecido).

Entonces, combinando estos materiales, y agregando pasta térmica entre algunas capas, se montaron las siguientes configuraciones:

- **Configuración 1:** Refrigerador líquido, pasta térmica, una celda Peltier, almohadilla, lámina de grafito, micro placa.
- **Configuración 2:** Refrigerador líquido, pasta térmica, una celda Peltier (rodeada por cartón pluma para aislar y dar estabilidad mecánica al conjunto), pasta térmica, plancha de aluminio, micro placa.
- **Configuración 3:** Refrigerador líquido, pasta térmica, una celda Peltier (sin rodear), pasta térmica, plancha de aluminio, micro placa.
- **Configuración 4:** Refrigerador líquido, pasta térmica, una celda Peltier (sin rodear), pasta térmica, plancha de aluminio, esponja mojada, micro placa.

En la Figura 14 puede verse un esquema de las diferentes capas en cada configuración.

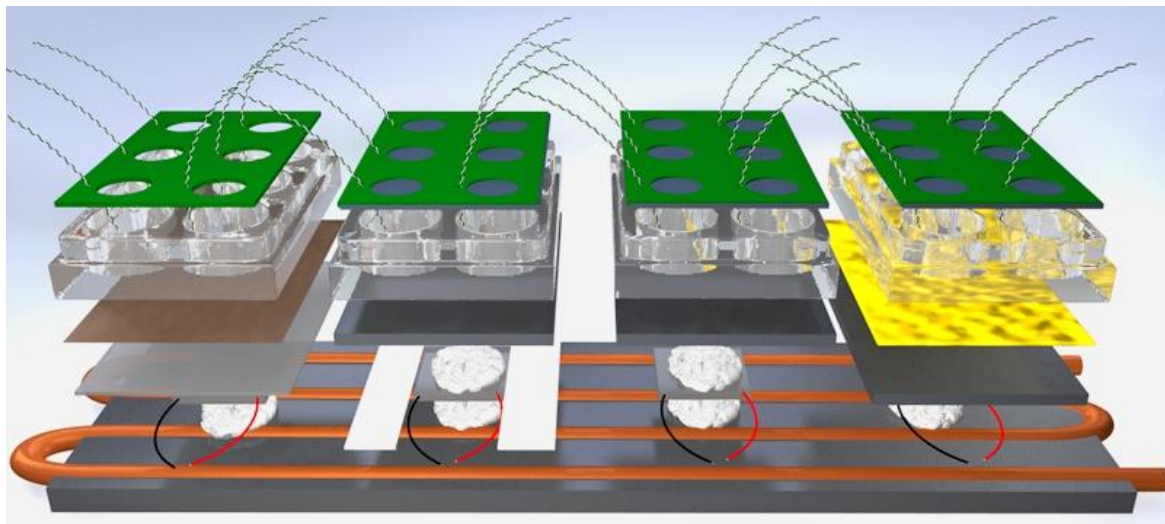


Figura 14. De izquierda a derecha, capas de las configuraciones 1, 2, 3 y 4.

Con cada una de las configuraciones, se midió la temperatura de cada pocillo una vez por segundo durante un minuto en las siguientes condiciones (las mismas para cada test): el refrigerador líquido estaba conectado al circuito de agua corriente para equiparar las condiciones de temperatura de la cara inferior de la celda Peltier (la que está en contacto con el refrigerador), la alimentación de la celda Peltier era de 12 V, sin limitar la corriente más allá del valor impuesto por la propia resistencia de la celda, y estaba centrada respecto a la micro placa. Para mantener los seis termopares en la misma posición, se colocaron en los agujeros creados en una placa de circuito impreso que puede verse en la Figura 14. Se trata de una superficie de PCB diseñada para sujetar electrodos en las micro placas y que se adapta a sus dimensiones. Además, se taparon las micro placas con su correspondiente tapa para no alterar las condiciones de los pocillos.

Se comparó la temperatura del termopar 104 (que normalmente es el que calienta más rápido debido a que la celda Peltier estaba colocada debajo del pocillo con dicho termopar) de las distintas configuraciones y se comprobó que la configuración que consigue un mejor acoplo térmico es la número 1, ya que es la que presentaba mayor pendiente, es decir en el mismo tiempo alcanza mayor temperatura (ver Anexo B).

Sin embargo, se vio que esta configuración no conseguía la misma temperatura en todos los pocillos, ya que para el mismo instante de tiempo había diferencias grandes de temperatura, con lo que se concluyó que la homogeneidad no está garantizada con una sola celda Peltier (ver Anexo B).

La homogeneidad es importante ya que interesa que las condiciones sean las mismas en todos los pocillos para que afecten por igual a todas las células y garantizar así la validez de los experimentos. Es por esto que se concluyó que una Peltier no era suficiente y se decidió entonces cubrir toda la base de la micro placa con seis celdas Peltier (en una matriz de 2 filas y 3 columnas, conectadas eléctricamente como se aprecia en la Figura 15) para garantizar la máxima homogeneidad posible.

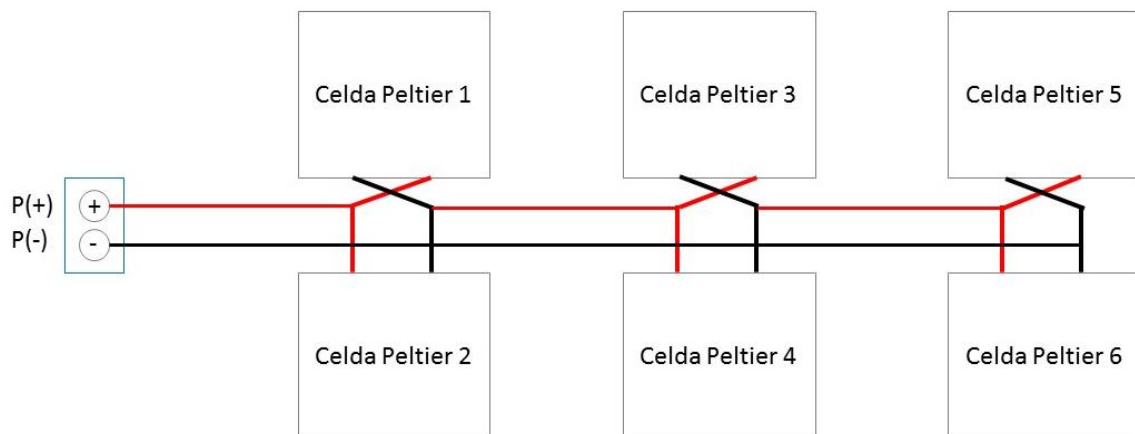


Figura 15. Esquema de la conexión eléctrica de la matriz de celdas Peltier.

Finalmente, el actuador definitivo puede verse en la Figura 16.

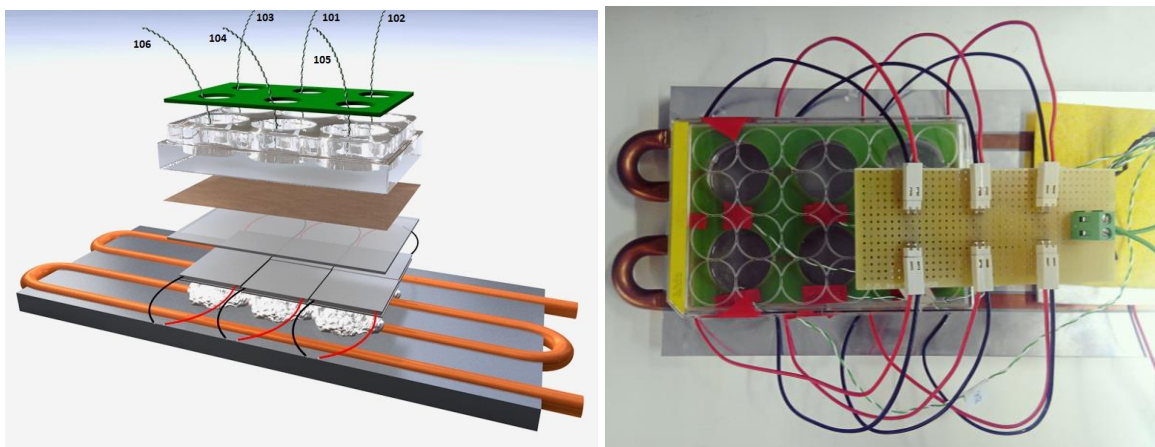


Figura 16. Configuración definitiva del actuador.

4.3. Caracterización del actuador

Para caracterizar el actuador y para posteriormente realimentar el control, se escogieron los termopares por las múltiples ventajas que presentaban frente a las demás opciones contempladas: no requieren alimentación, son económicos, más robustos y su tamaño es acorde con la aplicación. En concreto, se escogieron termopares de tipo K ya que son adecuados para este margen de temperatura y, juntamente con el tipo J, son los que están más disponibles en el mercado.

Se descartaron las demás opciones por los siguientes motivos:

- Los **termistores** se descartaron porque son más frágiles, precisan circuito de alimentación, no son lineales y su tamaño es mayor. Con ellos es difícil medir un punto concreto.
- Los **RTD** se descartaron porque son más caros y lentos, precisan circuito de alimentación y su tamaño mínimo es todavía mayor al de los termistores y no es acorde con la aplicación.

Es cierto que los termopares poseen unas desventajas que no pasan desapercibidas como que producen tensiones bajas (son poco sensibles), que precisan compensación de la temperatura de referencia y que tienen una ligera no linealidad. Pero ello queda resuelto con el dispositivo DAQ que se usó.

Para la adquisición de datos se optó por el modelo Agilent 34972A de Keysight Technologies (ver Figura 17) con ficha técnica [24]. Algunas de sus características más destacadas son:

- Se le pueden conectar una serie de módulos, uno de los cuales (el 34901A) ya está adaptado a termopares porque contiene una medida de la unión fría de referencia, lo que supliría algunas de las desventajas comentadas (ver Anexo C).
- Existen drivers para LabVIEW, con bloques preparados para la adquisición de temperatura, entre otras variables, con lo cual ya devuelve el valor real de la temperatura medida, hecho que suple las demás desventajas comentadas (ver Anexo C).
- A diferencia de la mayoría de DAQs, posee puerto de memoria USB para cargar los datos tanto a una unidad USB Flash como para pasarlos a un ordenador mediante cable USB.
- Tiene un software gratuito (BenchLink Data Logger Pro) con el que tomar medidas. Los primeros datos se obtuvieron mediante este programa, que muestra por pantalla en forma de gráfica el valor actual de las temperaturas y al final de la ejecución, devuelve los datos en formato .csv.

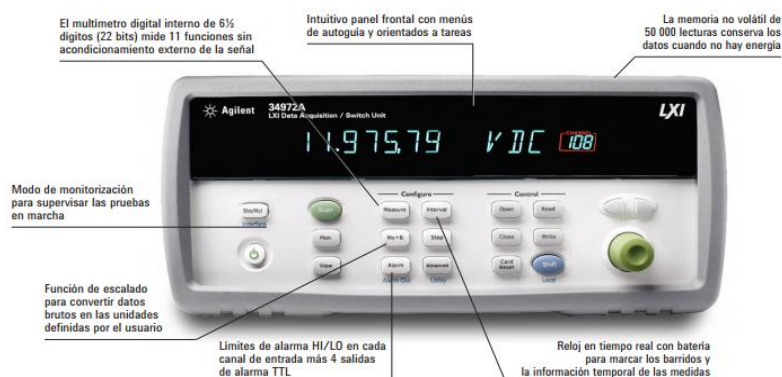


Figura 17. Panel frontal del DAQ Agilent 34972A. Fuente: [24].

Primeramente, se decidió comprobar si las medidas que se obtenían en los termopares eran las adecuadas. Para ello se calibraron los termopares con la ayuda del micro baño 7102 de Fluke Calibration con especificaciones [25]. Tal y como se aprecia en la Figura 18, se usó este aparato, que contiene aceite de silicona agitado para estabilizar al máximo la temperatura, ajustándolo a 25 °C y se comprobó el offset de los termopares.



Figura 18. Calibración de los termopares con el micro baño 7102 de Fluke Calibration.

Midiendo cada segundo durante aproximadamente un minuto los seis termopares en el interior del baño, se vio que siempre medían por encima de 25 °C. Con Excel, se hizo la resta de los valores medidos menos la referencia (25 °C) para ver el offset en cada momento y después se calculó el promedio, obteniendo los resultados de la Tabla 6.

	Desviación T_101 (°C)	Desviación T_102 (°C)	Desviación T_103 (°C)	Desviación T_104 (°C)	Desviación T_105 (°C)	Desviación T_106 (°C)
Promedio T_10X (°C)	1,461	1,573	1,669	1,736	1,797	1,897
Promedio Offset (°C)	1,689					
Diferencia máxima promedio entre termopares (°C)	0,436					

Tabla 6. Desviación de los termopares usados para medir.

4.4. Implementación del control

El control de la aplicación se lleva a cabo a través de LabVIEW. Se escogió LabVIEW como lenguaje para implementar la aplicación dado que es el más adecuado para controlar instrumentos y llevar a cabo rutinas de medida y control y sus representaciones gráficas. Sin embargo, dado que no conocía dicho entorno de programación, fue necesario un período de aprendizaje mediante tutoriales y el desarrollo fue más lento de lo esperado.

Para la implementación del control, se ha desarrollado un software con la finalidad de adquirir datos y de actuar sobre un circuito que controla la polaridad de las celdas Peltier a través del DAQ. Para poder comunicarse con el DAQ, se instalaron los drivers de LabVIEW correspondientes. Asimismo, para poder realizar el control se instaló el *PID and fuzzy logic toolkit* de LabVIEW.

A continuación, se explica el proceso de diseño e implementación seguidos, que se podría resumir en las siguientes etapas con los siguientes objetivos:

- **Etapla 1:** Conseguir obtener las 6 medidas desde el DAQ, mostrarlas por pantalla y guardarlas en un fichero Excel. Para ello es necesario conectar al DAQ el módulo Agilent 34901A (ver Anexo C).
- **Etapla 2:** Conseguir encender y apagar las celdas Peltier, así como controlar su polaridad para cambiar de modo (calentar o enfriar). Esto se especifica de momento manualmente. En esta etapa se desarrolla un circuito y un software. Para ello es necesario conectar al DAQ el módulo Agilent 34907A (ver Anexo C).
- **Etapla 3:** Juntar el desarrollo de las etapas 1 y 2 y comprobar que hace la acción correspondiente a las instrucciones introducidas manualmente.
- **Etapla 4:** Crear el control PID para el caso de calentar y comprobar su funcionamiento automático. Posteriormente, hacer lo mismo para el caso de enfriar. Finalmente, juntar ambos casos en un solo programa y comprobar que se ejecutan correctamente tanto los cambios de modo como el control. Este paso fue más complicado de lo esperado porque el módulo PID de LabVIEW está configurado para dar salidas analógicas y se ha tenido que adaptar a un control PWM lento.

Etapla 1

Se pretenden obtener las medidas de temperatura de los 6 termopares colocados en los pocillos a través del DAQ. Por ello se desarrolla un software que controla el módulo Agilent 34901A. En él, se inicializa primero la comunicación con el DAQ y se crea un fichero Excel. Una vez dentro de la estructura *While* se toman a cada segundo las 6 medidas de los termopares 101, 102, 103, 104, 105 y 106. El código de los termopares está diseñado de manera que el primer número corresponde a la ranura donde se conecta el módulo y los dos siguientes a la ranura donde se conecta el termopar (ver Anexo C). Además de tomar las medidas, muestra los valores por pantalla en una gráfica y los guarda en un fichero Excel. Al finalizar el programa, se cierra la conexión con el DAQ.

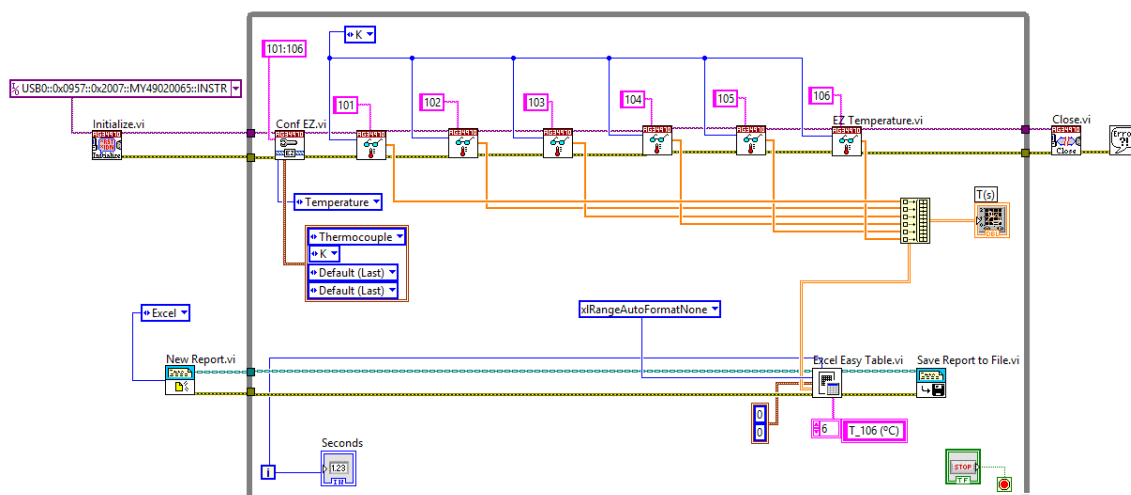


Figura 19. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 1.

Etapla 2

Se pretende conseguir encender y apagar las celdas Peltier, así como controlar su polaridad para cambiar el modo (calentar o enfriar). Esto de momento se hará manualmente, es decir, se indicará apretando a unos botones que serán los bits de control. Para lograr este objetivo, se desarrolla un circuito usando varios relés, concretamente el modelo G6E-134P-US de OMRON con datasheet [26]. Se ha escogido esta opción porque se comprobó que las salidas analógicas del módulo Agilent 34907A no daban suficiente corriente para las celdas Peltier. Además, esta alternativa es más compacta y económica que los relés de estado sólido.

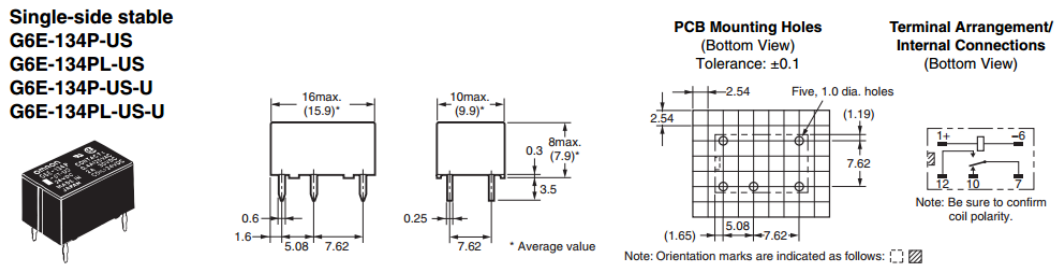


Figura 20. Características de los relés usados para el circuito de conmutación. Fuente: [26].

Como se aprecia en la Figura 20, el terminal 1 es la alimentación de dicho relé, que según [26] es de 5 V; los terminales 10 y 12 son las opciones a las cuales puede estar conectada la salida del relé, que es el terminal 7. Con el bit de control se decidirá si la salida es igual al terminal 10 o al terminal 12. Este bit de control (controlado por software) irá conectado al terminal 6. Así, cuando el bit de control sea igual a 1, la salida se conectará al terminal 10 y cuando sea igual a 0, la salida se conectará al terminal 12.

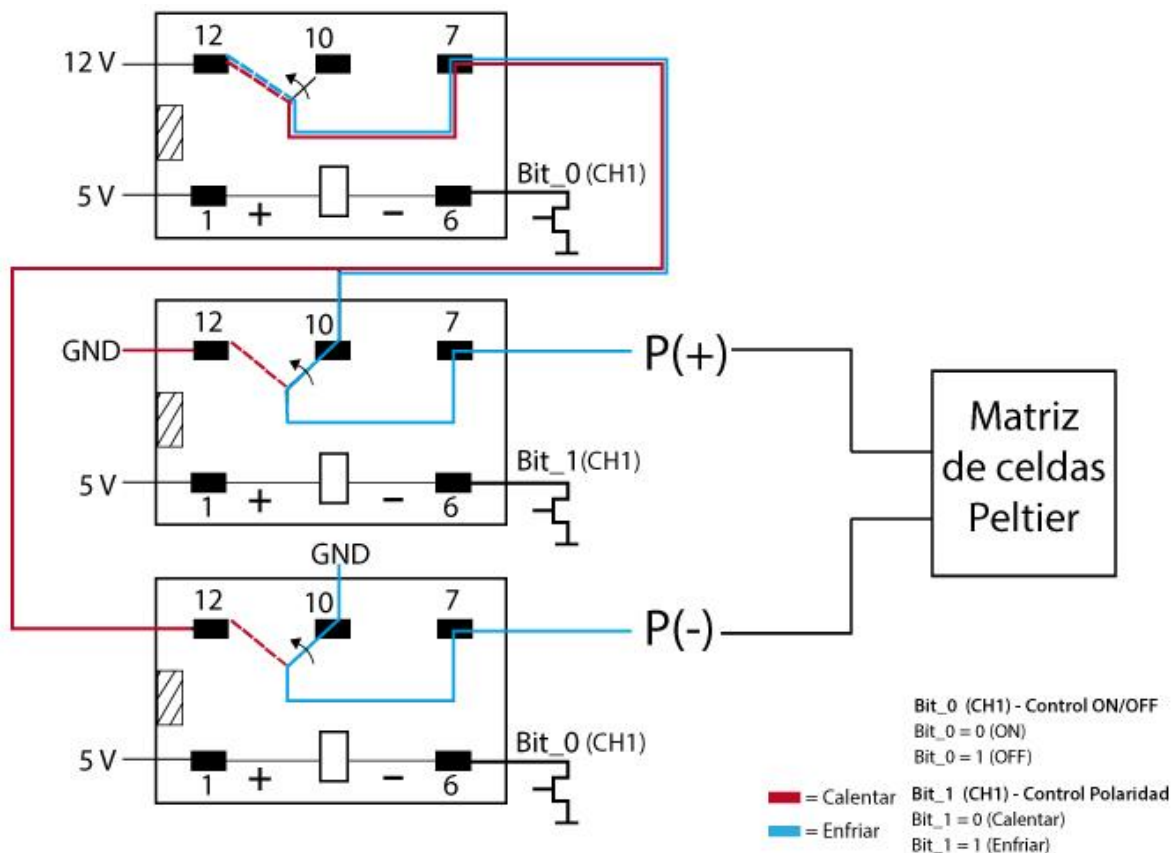


Figura 21. Esquemático del circuito de conmutación.

Primero, se diseña un circuito con el que dejar pasar o no la corriente según si la celda Peltier debe estar funcionando o no, respectivamente. Para ello se usa dicho relé alimentado a 5V y con el pin 12 conectado a una fuente de 12 V (la alimentación de las Peltier) y el bit 10 se deja al aire. El terminal 6 estará conectado al DAQ y será un bit de control (concretamente el bit 0 del canal digital 1 (ver Anexo C)) el que determinará si el relé se conecta a los 12 V (ON, será cuando valga 0) o permanece desconectado (OFF, cuando escriba un 1). La salida (terminal 7) irá conectada al circuito que elige la polaridad de las celdas Peltier.

A continuación, se diseña el circuito para elegir la polaridad. Las celdas Peltier tal y como están colocadas en el actuador, enfrían si se conectan con polaridad normal (es decir, el terminal positivo a alimentación y el negativo a masa). En cambio, si se invierte la polaridad (es decir, su terminal positivo se conecta a masa y el negativo a alimentación), calientan.

Para poder hacer cambios en el modo (enfriar o calentar), es necesario un hardware que pueda ir modificando físicamente las conexiones. Para ello se usan dos relés más, las salidas de los cuales están conectadas cada una a un terminal de la matriz de celdas Peltier. Un relé tiene su terminal 12 conectado a masa y el 10 conectado a la salida del anterior circuito, mientras que el otro tiene dichas conexiones al revés. Así, mediante el bit de control (que es el bit 1 del canal digital 1 (ver Anexo C)), se consigue estar en polaridad normal y enfriar (cuando el bit de control vale 1) o en polaridad invertida y calentar (cuando el bit de control escribe un 0).

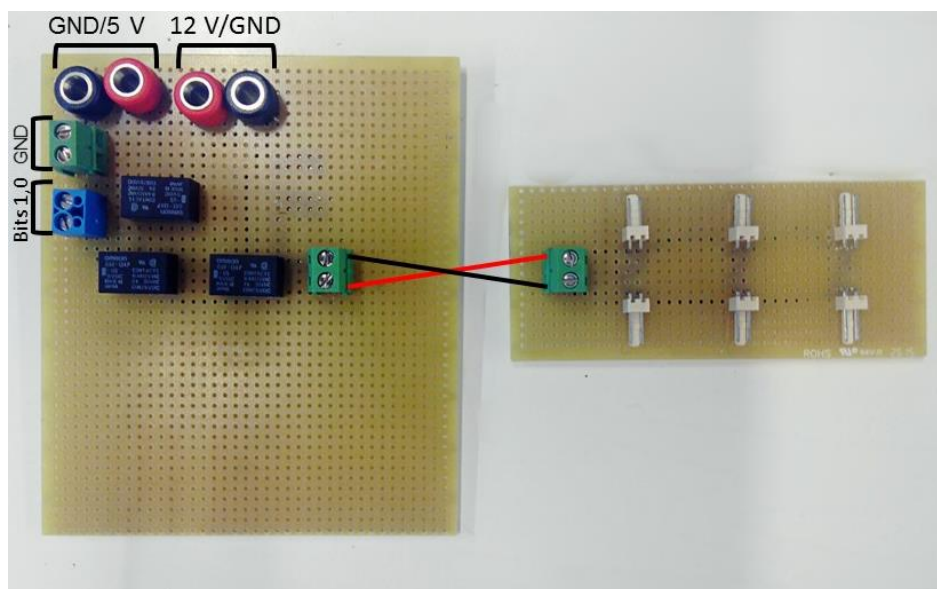


Figura 22. Circuito de conmutación.

Una vez el circuito está listo (ver Figura 22), se procede a diseñar el software que indicará el valor de los bits de control mediante el módulo Agilent 34907A. En él, se inicializa la comunicación con el DAQ y dentro de la estructura del *While*, se configura un canal digital de 8 bits (bloque de *Digital Output* (ver Anexo E)). Se escribe un 2 en la entrada *slot* de dicho bloque ya que se corresponde a la ranura del DAQ donde está conectado el módulo (ver Anexo C). En el bloque de *Digital Output* se escribe *false* si se trata del canal 1 o *true* si se trata del canal 2. En este caso, los cables para el control se han conectado a las ranuras 0 y 1 del canal digital 1 (ver Anexo C), por tanto, la entrada será *false* y los bits que harán el control serán los dos primeros. Al finalizar el programa, se cierra la conexión con el DAQ.

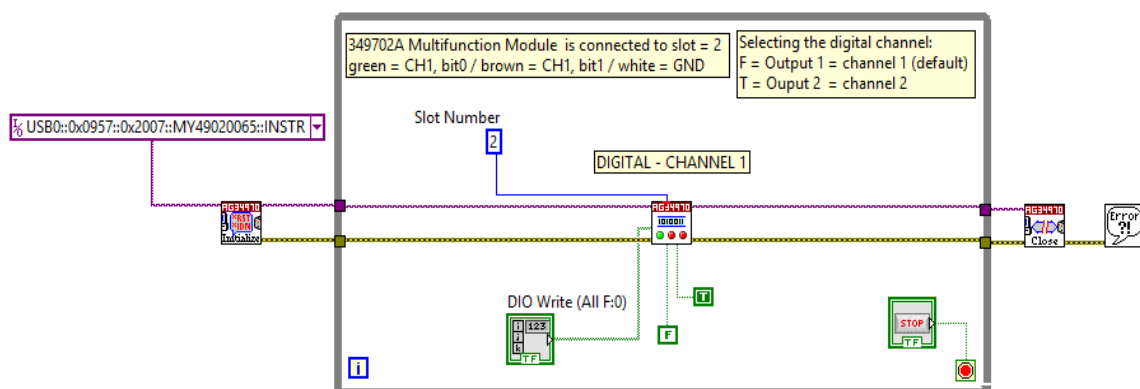


Figura 23. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 2.

Sólo tendrán validez los dos primeros bits, ya que son los únicos con el cable conectado a la ranura (ver Anexo C). El panel que ve el usuario final es el siguiente:

Panel del usuario final	Bit 0 (control ON/OFF)	Bit 1 (control modo)	Acción
DIO Write (All F:0)	0	0	ON – calentar
DIO Write (All F:0)	0	1	ON – enfriar
DIO Write (All F:0)	1	0	OFF
DIO Write (All F:0)	1	1	OFF

Tabla 7. Bits de control para el encendido y modo de las celdas Peltier.

Etapa 3

Se juntó el desarrollo de las etapas anteriores y se comprobó que el actuador realizaba la acción correspondiente a las instrucciones introducidas manualmente.

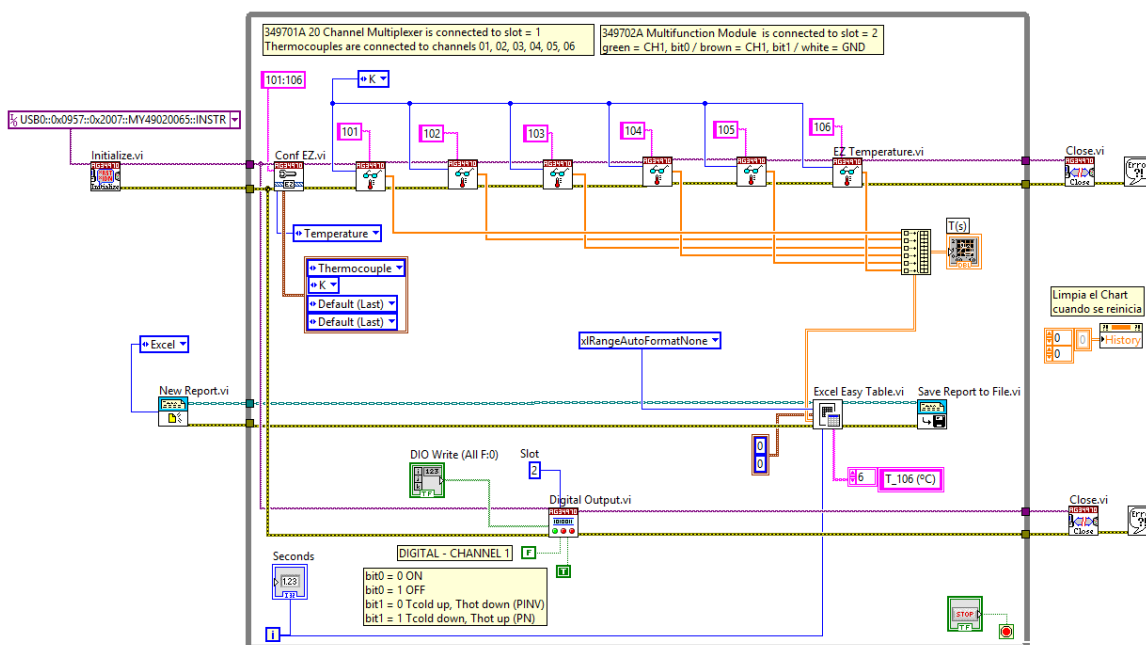


Figura 24. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 3.

Etapa 4

Se pretende implementar el control PID. Primero se realiza para el caso de calentar y se comprueba su funcionamiento. Una vez funciona, se piensa en los cambios que deben hacerse para el caso de enfriar y se valida que son correctos. Finalmente, se juntan ambos casos en un solo programa y se comprueba que los cambios de modo y el control se ejecutan correctamente.

Primero se comprobó que era necesario que las acciones fueran secuenciales y no paralelas como se ejecutan normalmente en LabVIEW, así que se optó por introducir una estructura *Flat sequence* (ver Anexo E) para poder realizar acciones en serie. Esta estructura se colocó dentro de la estructura *While* de ejecución. Este *While* se ejecuta una vez cada 10 segundos (usando el bloque *Wait until Next ms Multiple* (ver Anexo E)) para tener tiempo a realizar todas las acciones y dar margen a que éstas hagan efecto.

La primera acción en la *Flat sequence* es la medida de las temperaturas. A continuación, se guardan los datos en un fichero Excel y se toma la temperatura del termopar 101 como referencia. Después, se ejecuta el control con el bloque PID (ver Anexo E):

- En la entrada *Setpoint* se conecta el valor del límite superior, previamente introducido por el usuario en el panel frontal (ver Figura 63 en el Anexo E). En el caso del IBEC equivaldría a 37, ya que estamos en el caso de calentar.
- La entrada *Process variable* se corresponde a la temperatura medida. Se toma la del termopar 101, por eso también interesa máxima homogeneidad.
- En *PID gains* se introducen los parámetros medidos mediante el método basado en la curva de reacción. Hay que tener en cuenta que el bloque de PID pide las constantes de la siguiente manera: la K_C en forma de ganancia, el tiempo integral T_i en minutos y el tiempo derivativo T_d también en minutos.
- Se define el rango de salidas de -100 a 100, que es el máximo permitido. La salida será positiva si hay que calentar (es decir, si la temperatura medida está por debajo de la consigna) o negativa en caso de tener que enfriar (cuando la temperatura medida esté por encima del *Setpoint*).

A continuación, la salida se transforma en un PWM en tiempo. Esto se consigue transformando el valor absoluto de la salida en un número del 0 al 10 (ya que es el tiempo del bucle) con un factor de conversión (ver Anexo E). Este valor se introduce como la variable N de una sentencia *For*. Esta sentencia tiene un *Wait until Next ms Multiple* que hace que cada repetición dure un segundo. Como el *For* se ejecuta N veces, entonces equivaldrá a N segundos. Dentro de este *For* se configuran los bits de control según como se hacía en las etapas 2 y 3 pero escribiendo los valores correspondientes de manera automática (ya no se introduce manualmente), es decir, es el encargado de realizar la acción correspondiente (calentar o enfriar, según si la salida del PID es positiva o negativa, respectivamente). Así, si la salida del PID es grande (porque la diferencia entre valor deseado y el medido también lo es), dará un valor más próximo al 10 que al 0 y se ejecutará la acción correspondiente durante más tiempo.

Finalmente, en el último recuadro se desactivan las Peltier para los segundos restantes ($10 - N$). Así, si el PID ha dado como valor de salida un número pequeño (porque la diferencia entre el *Setpoint* y la medida lo es), dará un valor más próximo al 0 que al 10 y por tanto el tiempo restante será un valor más próximo al 10 que al 0 y, entonces, las celdas estarán desactivadas la mayor parte del tiempo.

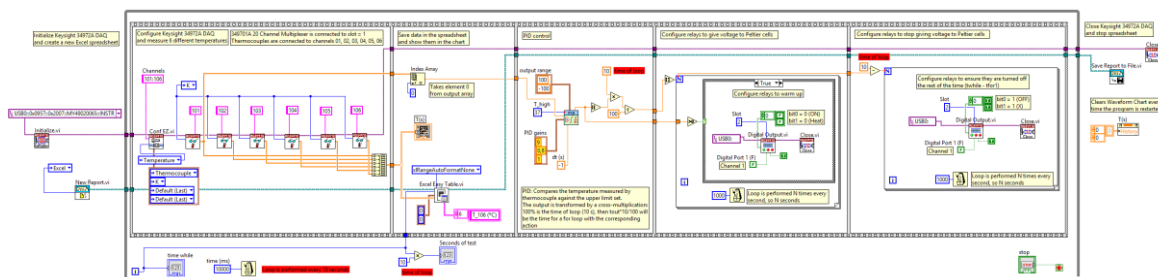


Figura 25. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 4 para el caso de calentar.

Se comprueba que el control actúa como se esperaba y se procede a desarrollar el caso de enfriar. Se trata del mismo diagrama que el de la Figura 25 pero con ligeros cambios. En el caso de enfriar, se toma como *Setpoint* el límite inferior introducido por el usuario (en el caso del IBEC será 24, la temperatura del límite inferior) y los parámetros PID se pueden ajustar a la respuesta del actuador cuando se pretende enfriar, en caso de que la respuesta sea distinta que la que se da en el caso de calentar. Por lo que respecta al resto del diagrama, se mantiene igual. Una vez hechos los cambios, se comprobó su correcto funcionamiento y se procedió a unificar todo en un solo programa.

La última versión del programa debe seleccionar si se encuentra en el modo calentar o enfriar. Esto se consigue con el bloque *Select* (ver Anexo E). Como lo que varía según el modo son el *Setpoint* y los *PID gains*, se aplica en ambos. La manera en cómo se sabe si se está en modo enfriar o calentar es la siguiente: el tiempo de ejecución en minutos se divide entre el tiempo de ciclo (que es el introducido por el usuario en el panel frontal), también en minutos. El número resultante se redondea a la baja, dando un entero. Este entero se divide entre dos y se calcula el módulo para saber si es par o no. En caso de ser par, los parámetros escogidos por el bloque *Select* serán los correspondientes al modo calentar y cuando sea impar escogerá los correspondientes al modo enfriar (ver Anexo E).

Además, el programa incorpora ciertos cambios, ya que a raíz de varios tests se vio que, a partir del segundo ciclo, el control no se comportaba igual. Finalmente, se concluyó que era culpa de la memoria del bloque del PID y que éste debía reiniciarse cada vez que hubiera un cambio de modo. Para ello, se divide el tiempo de ejecución (en minutos) entre el tiempo de ciclo (introducido por el usuario) y si da un número entero significa que cambia de modo y que, por tanto, debe reiniciarse la memoria del bloque PID (ver Anexo E).

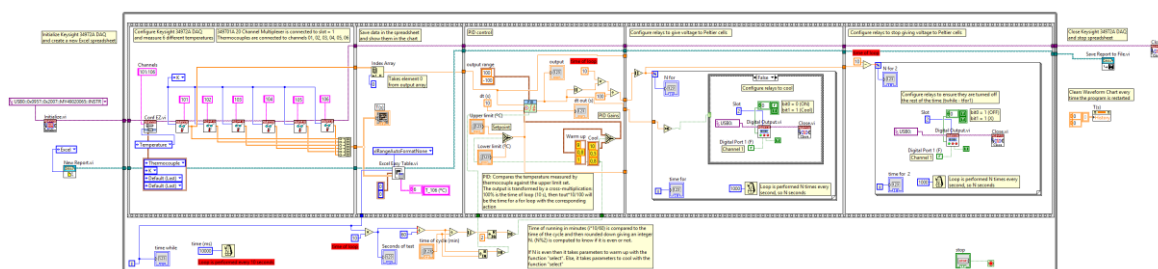


Figura 26. Software en LabVIEW desarrollado en la Etapa 4 (versión definitiva).

4.5. Caracterización del control

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del programa, se procedió a buscar los parámetros PID definitivos usando el método basado en la curva de reacción, explicado anteriormente (ver Figuras 47 y 48 en el Anexo D). Se obtuvieron $K_p = 3.85$, $T_i = 0.027 \text{ min}$ y $T_d = 0.067 \text{ min}$ para el modo calentar y $K_p = 4.62$, $T_i = 0.3 \text{ min}$ y $T_d = 0.075 \text{ min}$ para enfriar.

Aunque como se comprobó, el PID con estos parámetros podía mejorarse en cuanto a velocidad (ver Figura 49 en el Anexo D), así que se decidió ajustarlo manualmente considerando algunas reglas heurísticas de ajuste (ver Anexo D). Finalmente, se definieron los parámetros PID como: $K_p = 10$, $T_i = 0.5 \text{ min}$ y $T_d = 1 \text{ min}$ y se obtuvo la Figura 27. Se simularon tiempos de ciclo de 15 minutos y, como se aprecia, se consigue un tiempo de conmutación de subida de entre 150 y 400 segundos y de bajada entre 170 y 300 segundos.

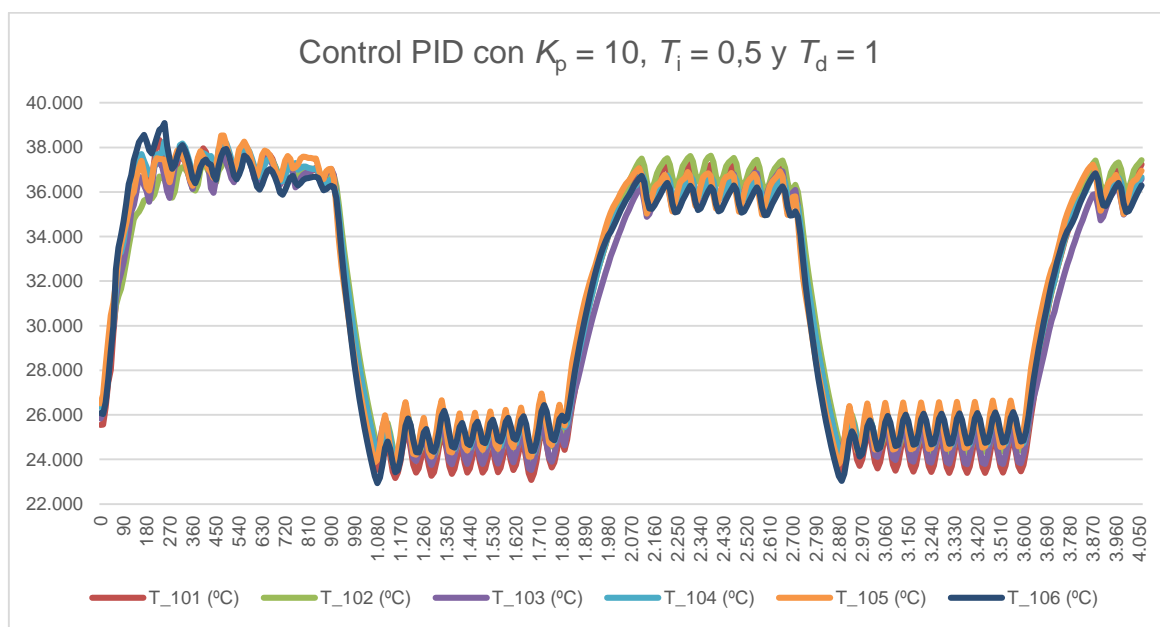


Figura 27. Respuesta del control PID obtenido en el laboratorio.

No sabíamos cómo reaccionarían las células ante estos sobre impulsos, así que se consultó con los científicos del IBEC en el primer test (realizado sólo con agua) y dijeron que les interesaba una respuesta más conservadora (es decir, más lenta y sin presentar cambios tan bruscos). Por eso, se ajustaron más aún los parámetros del control PID.

4.6. Propuesta de sistema mínimo

Juntamente con Pol Timoneda, estudiante de Ciclos Formativos de Grado Superior en prácticas en el laboratorio del Departamento, se desarrolló una alternativa al sistema desarrollado en este proyecto para comprobar si sería posible obtener resultados similares con un sistema más compacto.

Se pensó en usar una placa de Arduino UNO junto con una Arduino Motor Shield para conseguir dar la potencia necesaria a las placas Peltier (con los pines 3 o 11, PWM A o PWM B) además de poder invertir la polaridad (usando los pines 12 o 13, dirA o dirB). Una de las ventajas que tiene este sistema es que posee dos salidas (A y B) por lo que se podrían conectar celdas Peltier de manera independiente, lo que significaría poder aplicar controles distintos durante el mismo experimento.

Para realizar las medidas, se usó también un termopar tipo K. Sin embargo, al no contar con las ventajas que proporciona el módulo Agilent 34901A (ver Anexo C), se tuvo que montar un circuito de acondicionamiento ya que el voltaje proporcionado por el termopar tenía amplitudes muy pequeñas. Así, se optó por usar el modelo AD8495 de Analog Devices. Se trata de un amplificador especial para termopares, ya que en su interior implementa la medida de temperatura de la unión fría y su compensación.

Como la señal obtenida seguía teniendo amplitudes pequeñas, se añadió en serie un amplificador operacional, modelo TLC2272 de Texas Instruments. Ambos se alimentaron con 5 V proporcionados por la placa Arduino. Esta placa, a su vez, se alimentó con 12 V de una fuente de alimentación, limitada a 1 A.

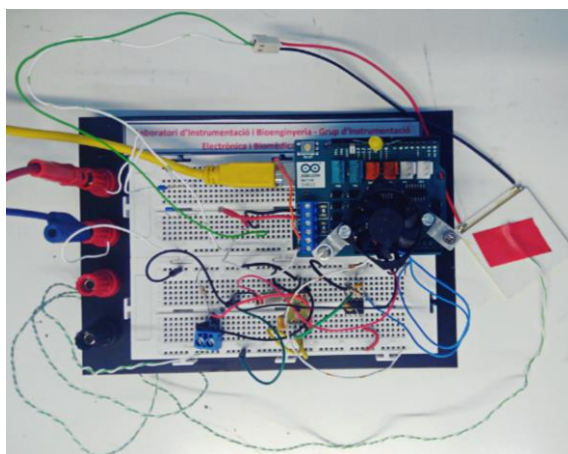


Figura 28. Circuito implementado para el sistema mínimo.

Para desarrollar el control PID, se usó la librería PID de Arduino (ver anexo F). Además, con tal de facilitar la usabilidad, se desarrolló un software más intuitivo con el programa Microsoft Visual Studio (ver Figura 29) para que el usuario final pudiese introducir las temperaturas máxima y mínima que se pretendían alcanzar en cada etapa, además de los minutos de éstas. Este software guarda los datos en un fichero Excel para que luego puedan ser consultados o graficados.

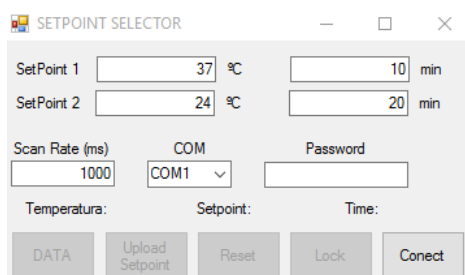


Figura 29. Interface de usuario desarrollada con Microsoft Visual Studio.

Finalmente, con tal de validar el sistema, se realizaron varios tests. Si bien todas las pruebas se hicieron con una sola celda Peltier directamente tocando la micro placa (por tanto, el acoplo térmico no era correcto), se vio que el resultado no era del todo malo. Sin embargo, se comprobó que estaba más limitado que el desarrollado con LabVIEW y que no resultaba del todo fiable. Como no se avanzó tanto en la solución, no se puede hacer una comparación de igual a igual con el sistema desarrollado en LabVIEW.

En un futuro, se propone mejorar la robustez usando un sistema Arduino PLC, además de añadir una LCD (a modo de pantalla) y los correspondientes botones con tal de reducir aún más su tamaño y prescindir del ordenador mientras se toman las medidas.

5. Validación y resultados

En esta sección se detallan los procedimientos seguidos a la hora de validar la solución desarrollada y se muestran los resultados conseguidos en el laboratorio.

Tests preliminares en el laboratorio

En el laboratorio se hicieron múltiples tests para cada etapa hasta dar con la versión final que cumplía los objetivos planteados para cada una de ellas. Los tests realizados en el laboratorio se hicieron con un centímetro de agua en cada pocillo. Esta precisión se consiguió con la pipeta Transferpette de Brand Tech [27].

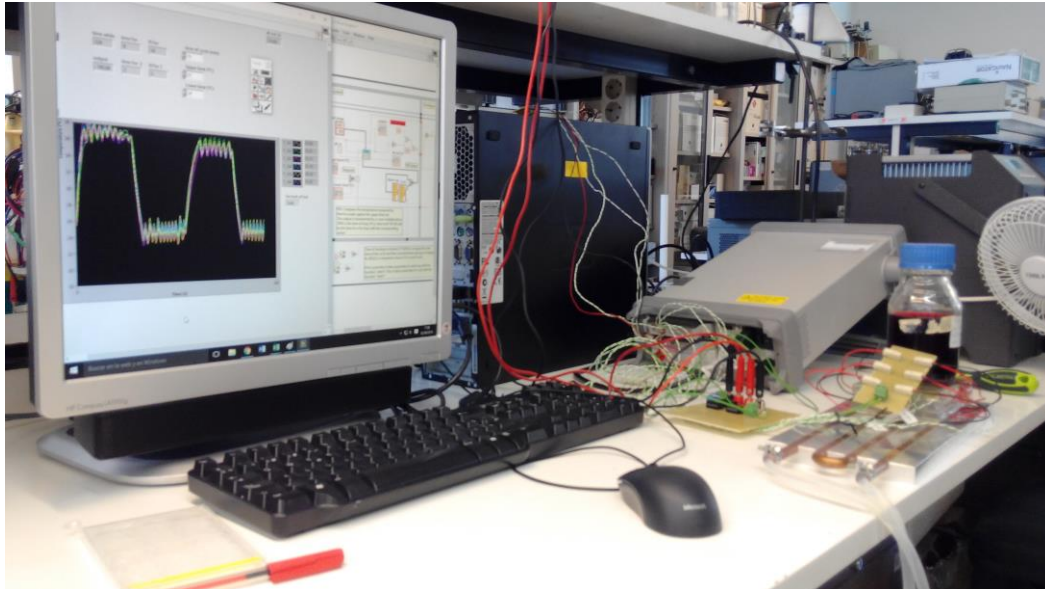


Figura 30. Test en el laboratorio del Departamento.

Primer test en el IBEC

Se realizó un primer test en el IBEC, sólo con agua (tal y como se había estado haciendo en el laboratorio), para conocer de primera mano el entorno en el que trabajan y validar que el prototipo desarrollado era práctico y cumplía los parámetros y medidas acordados en la primera reunión.

Como se puede ver en la Figura 31, se introdujo el actuador en la incubadora y el resto (el circuito de conmutación, el DAQ, la fuente de alimentación y el ordenador) quedaron alrededor de la incubadora.

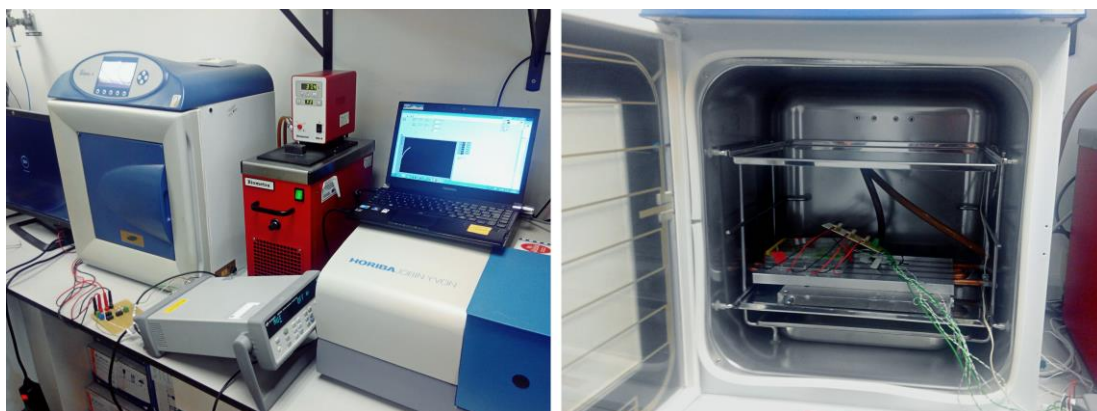


Figura 31. Primer test en el IBEC (realizado sólo con agua).

De dicho test se extrajeron varias conclusiones:

- En el IBEC prefieren una respuesta más lenta antes que una respuesta rápida y con sobre impulso. Se ajustaron los parámetros para satisfacer estas necesidades.
- Las condiciones en las que se encuentra el actuador son distintas a las que se tienen en el laboratorio ya que en éste se está expuesto a los cambios en la temperatura ambiente mientras que en el IBEC se encuentra en una incubadora fijada a 37 °C. Como está fijada al límite superior, cuesta más enfriar que calentar y esto puede afectar a la manera en cómo se han ajustado los parámetros. Con tal de tener las mismas condiciones y hacer el mismo “esfuerzo” tanto al calentar como al enfriar, lo más lógico sería poner la temperatura de la placa con el circuito de agua en un punto medio entre los 24 °C y los 37 °C
- El PC debe tener el bloqueo de pantalla desactivado para que la comunicación entre PC y DAQ no se interrumpa durante la realización de la prueba.

Último test en el laboratorio

El último test realizado en el laboratorio se ha llevado a cabo con la última versión del software desarrollado en la Etapa 4 y ajustando los parámetros del PID según lo requerido en el IBEC para encontrar una respuesta rápida, pero sin provocar cambios bruscos una vez alcanzada la temperatura deseada. Finalmente, los parámetros que se usaron fueron: $K_p = 10$; $T_i = 1$; $T_d = 0,2$ y se obtuvo la respuesta de la Figura 32, que como puede observarse, presenta una diferencia de temperatura entre pocillos de menos de un grado durante la conmutación y, muy puntualmente, de entre 1 y 2 grados en los picos. Los tiempos que se consiguen son 290 segundos al calentar y 210 al enfriar. No es una respuesta tan rápida como se había obtenido, pero no presenta cambios bruscos.

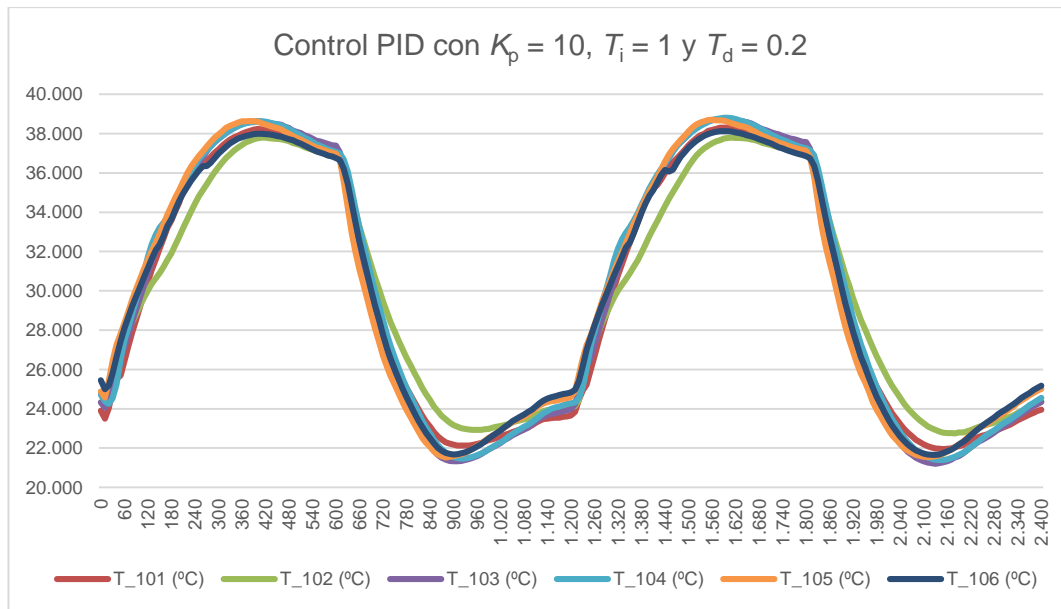


Figura 32. Respuesta del control PID obtenido en el laboratorio.

Segundo test en el IBEC

En el periodo entre la entrega de la memoria y la lectura de esta tesis, se pretende validar el prototipo en el IBEC, mediante un test real con células madre. No ha sido posible realizarlo antes porque la persona que se encarga de preparar los cultivos de células madre en el laboratorio está fuera durante el mes de junio.

Con este test se pretende validar la implementación final desarrollada y analizar los resultados obtenidos. Dichos resultados se mostrarán el día de la presentación.

6. Costes

A continuación, se detallan los componentes que forman parte de la solución final:

Elemento	Ref. producto	Fabricante/Proveedor	Precio/Ud. (€)	Uds.	Total (€)
Celdas Peltier*	APH-161-12-14-E	E. Thermodynamics	27,77	6	166,62
Refrigerador líquido*	416601U00000G 4 pasos	Avid Thermalloy	104,49	1	104,49
Micro placa*	734-0948	Corning	2,6	1	2,6
Pasta Térmica*	Cooling MX-2	Hama Arctic	7,99	1	7,99
Almohadilla*	467MP 200 MP	3M	3,48	1	3,48
Lámina grafito*	GCS-070-G	GCS	46,10	1	46,10
Tubos de plástico*	Tubo plástico	Tienda de materiales	6,90	2	13,80
Fuente de alimentación*	Fuente de alimentación	Tienda de electrónica	92	1	92
Ordenador*	Ordenador	Tienda de informática	300	1	300
Licencia LabVIEW	Full Edition (w/ PID & fuzzy logic toolkit)	National Instruments	3350	1	3350
Tarjeta adquisición	Agilent 34972A	Keysight Technologies	1768	1	1768
Módulo Multiplexor	Agilent 34901A	Keysight Technologies	469	1	469
Módulo Multifunción	Agilent 34907A	Keysight Technologies	378	1	378
Termopar*	219-4315	Labfacility	6,44	1	6,44
Placa de topos	Placa de topos	Tienda de electrónica	2,16	1	2,16
Cables*	Cables	Tienda de electrónica	4,53	1 pack	4,53
Cables banana*	Cables banana	Tienda de electrónica	1,10	4	4,40
Relés	G6E-134P	OMRON	4,53	3	13,59
Regletas	Regletas	Tienda de electrónica	0,22	5	1,10
Banana hembra	Banana hembra	Tienda de electrónica	0,68	4	2,72
Conector poste macho acodado	Conector poste macho acodado	Tienda de electrónica	0,18	6	1,08
Conector poste hembra recto	Conector poste hembra recto	Tienda de electrónica	0,12	6	0,72
TOTAL					6738,82

Tabla 8. Lista final de componentes usados en el prototipo.

A continuación, se detalla el material adicional usado temporalmente para el desarrollo de la solución final y sobre el que habría que sumar las respectivas amortizaciones:

Elemento	Ref. producto	Fabricante/Proveedor	Precio/Ud. (€)	Uds.	Total (€)
Pipeta	704780 Transferpette	Brand Tech	276,21	1	276,21
Chapa aluminio	Chapa aluminio	Tienda de materiales	14,91	1	14,91
Bayeta	Bayeta	Supermercado	1,15	1	1,15
Bidón vacío	Bidón vacío	Supermercado	30	1	30
Micro baño	7102	Fluke Calibration	3200	1	3200
Termopares	219-4315	Labfacility	6,44	5	32,20
Cocodrilos	Cocodrilos	Tienda de electrónica	0,98	2	1,96
Soldador	Soldador	Tienda de electrónica	21	1	21
Estaño	Estaño	Tienda de electrónica	3,32	1	3,32
Pelacables	Pelacables	Tienda de electrónica	4,54	1	4,54
Alicates	Alicates	Tienda de materiales	8,41	1	8,41
Lija	Lija	Tienda de materiales	1,96	1	1,96
Sierra circular	Sierra circular	Dremel	78,91	1	78,91
Destornillador	Destornillador	Tienda de materiales	6,53	1	6,53
Tijeras	Tijeras	Tienda de materiales	4,86	1	4,86
TOTAL					3685,96

Tabla 9. Lista de material adicional usado para la realización del prototipo.

En cuanto al presupuesto en personal, se ha hecho el cálculo del salario del autor del proyecto como si éste realizara su TFG en una empresa; es decir, asumiendo que éste recibe el salario mínimo impuesto por la Universidad durante los convenios de prácticas:

Personal	Tareas realizadas	Horas dedicadas	Salario (€/h)	Total (€)
Autor del proyecto	Documentación, diseño, implementación y validación del prototipo	673	8	5384
TOTAL				5384

Tabla 10. Presupuesto en personal.

Finalmente, se detalla el coste de la propuesta de sistema mínimo. Al material usado para la implementación de esta alternativa se le suman los elementos con asterisco en la primera tabla, ya que son necesarios también en esta solución:

Elemento	Ref. producto	Fabricante/Proveedor	Precio/Ud. (€)	Uds.	Total (€)
Arduino UNO	Arduino UNO	Arduino	20	1	20
Arduino Motor Shield	Arduino Motor Shield	Arduino	24,55	1	24,55
Amplificador para termopares	AD8495	Analog Devices	7,16	1	7,16
Amplificador operacional	TLC2272	Texas Instruments	1,86	1	1,86
Cable USB	Cable USB	Tienda de electrónica	2,49	1	2,49
Protoboard	Protoboard	Tienda de electrónica	5,15	1	5,15
Condensadores	Condensadores	Tienda de electrónica	0,28	3	0,84
Resistencias	Resistencias	Tienda de electrónica	0,03	2	0,06
Material igualmente necesario para esta solución*					752,45
TOTAL					814,56

Tabla 11. Lista de componentes usados en la propuesta de sistema mínimo.

7. Conclusiones y líneas futuras

Tras lo expuesto, se puede concluir que los objetivos académicos planteados en el primer apartado se han cumplido, ya que se tuvo la capacidad de formular y resolver un problema real, trabajar y aprender de manera autónoma además de planificar las tareas para lograr la mayoría de los objetivos específicos a tiempo. Si bien es cierto que algunas tareas han conllevado más tiempo del esperado por los motivos expuestos anteriormente, finalmente se han logrado los objetivos principales que eran identificar las necesidades del usuario final y en base a ello diseñar, implementar y validar un prototipo que cumpla una serie de especificaciones y requerimientos detallados al inicio. De éstos se han cumplido la mayoría, aunque hay algunas excepciones:

- El producto final se ha desarrollado para una sola micro placa. Se debería replicar tres veces más lo hecho hasta ahora.
- No se ha tenido tiempo de adaptar el producto al uso de un microscopio invertido porque la carga de trabajo de todo lo demás resultó ser suficiente para el periodo de desarrollo del proyecto. Esto se planteó como un extra, si el tiempo lo permitía.

Este proyecto trataba de mejorar mayoritariamente dos aspectos: la automatización del sistema y los tiempos de conmutación entre temperaturas.

La automatización del sistema se ha conseguido mediante el uso de un circuito de relés y un software desarrollado mediante LabVIEW. Así, el usuario final sólo debe encender la fuente y el DAQ y ejecutar el programa desde un ordenador, donde previamente ha introducido los datos (límites de temperatura y tiempo de ciclo).

Los tiempos de conmutación entre temperaturas logrados son mucho mejores a los obtenidos por el IBEC, como consecuencia de la mejora del acoplamiento térmico entre el actuador y las placas de cultivo y del uso de un lazo de control. Mientras que allí tanto el incremento como el decremento de temperatura suponen 20 minutos cada uno, en el laboratorio se ha trabajado con tiempos de conmutación de entre 2 y 7 minutos. Como el mínimo tiempo no estaba claro, se considera un buen resultado y, aunque quizás podría mejorarse estudiando la efectividad del acoplo u otras alternativas de diseño, no se considera una mejora crucial ya que se vio que a los científicos del IBEC no les interesaba demasiado una respuesta tan rápida y con mucho sobre impulso, sino más bien una respuesta más conservadora y sin cambios bruscos una vez alcanzada la temperatura deseada.

Al tratarse de un primer prototipo, se pueden realizar aún varias mejoras. Se proponen:

- El control se caracteriza sólo con el termopar (el 101). Quizás sería más conveniente que la entrada del PID fuera la media de todas las temperaturas. Sin embargo, se pretendía testear un caso real, ya que la solución final está pensada para medir sólo una temperatura, con lo que ya sería correcto.
- El software de LabVIEW debería ser más robusto ante errores: deberían bloquearse los valores introducidos por el usuario una vez empezada la ejecución del programa, además de comprobarse que los valores son los correspondientes (que los límites no están al revés) y que son valores reales y lógicos (por ejemplo, positivos y limitados dentro de un margen aceptable).
- Se debería poder definir por separado el tiempo de enfriar y el tiempo de calentar. Además, tal y como está configurado el software ahora mismo, se cuenta todo el tiempo de la etapa y quizás sería más interesante obtener el tiempo que está estable en la temperatura límite o el tiempo a partir del paso por el LSCT.

Bibliografía

- [1] M. Valeska Bianchi, "Dynamic stem cell culture on thermo-responsive PNIPAAm substrate", Institute for Bioengineering of Catalonia (IBEC), 2015.
- [2] IBEC, "Molecular dynamics at cell-biomaterial interface". [Online]. Available: <http://www.ibecbarcelona.eu/es/research-groups/molecular-dynamics-at-cell-biomaterial-interface/>.
- [3] EuroStemCell y autores colaboradores, "Glosario". [Online]. Available: <http://www.eurostemcell.org/es/glosario>.
- [4] C. for R. M. EuroStemCell, Seventh framework programme, University of Edinburgh, "Presentando: las células madre", p. 34, 2011.
- [5] M. Luque, "Las células madre entran en diálogo con células que regulan su futuro". [Online]. Available: <http://www.solociencia.com/biologia/06120801.html>.
- [6] M. E. Nash, D. Healy, W. M. Carroll, C. Elvira and Y. A. Rochev, "Cell and cell sheet recovery from pNIPAm coatings; motivation and history to present day approaches", *J. Mater. Chem.*, vol. 22, pp. 19376–19389, 2012.
- [7] F. of E. (Cairo U. Mechanical Power Engineering Department), "MPE 635: Electronics Cooling". [Online]. Available: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/>.
- [8] G. Patterson and M. Sobral, "Efecto Peltier", 2007.
- [9] Grupo de investigación de Ingeniería Térmica (Universidad Pública de Navarra), "Introducción a la Termoelectricidad". [Online]. Available: [http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion a TE\(c\).htm](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion a TE(c).htm).
- [10] A. P. Sandoval, E. Espinosa, and J. L. Barahona, "Celdas Peltier: Una alternativa para sistemas de enfriamiento con base en semiconductor", Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- [11] Avid Thermalloy, "How a Heat Pipe Works". [Online]. Available: <http://www.aavid.com/product-group/heatpipe/operate>.
- [12] Alma de herrero, "Como funciona una nevera", 2008. [Online]. Available: <http://almadeherrero.blogspot.com.es/2008/01/como-funciona-una-nevera.html>.
- [13] P. Coronado, "Tema 3. Sensores (curso de electrónica básica e instrumentación)", Universidad Autónoma de Madrid, p. 137.
- [14] U. R. L. La Salle, "Adquisición y control automático. Temperatura. Termopares", Barcelona, p. 23, 2003.
- [15] I. Moreno Velasco, "Sensores generadores", Universidad de Burgos, p. 14, 2004.
- [16] R. Pallas, *Sensores y acondicionadores de señal*, 4ª Edición. 2005.
- [17] S. Gomáriz, D. Biel, J. Matas, and M. Reyes, *Teoría de control. Diseño electrónico*. Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [18] V. Mazzone, "Controladores PID", Universidad Nacional de Quilmes, p. 12, 2002.
- [19] Thomas Scientific, "Falcon® Multiwell Plates For Cell Culture", 2016. [Online]. Available: http://www.thomassci.com/Laboratory-Supplies/Plates/_/bd-falcon-multiwell-plates-for-cell-culture.
- [20] Adaptive Thermal Management, "APH-161-12-14-E Peltier cooler module".
- [21] Aavid Thermalloy, "Hi-Contact™ Liquid Cold Plates".
- [22] 3M™, "Adhesive Transfer Tapes with Adhesive 200MP", 2014.

- [23] Global Component Sourcing, “GCS-070 Graphite heat spreader”.
- [24] Keysight Technologies, “Keysight 34970A Data Acquisition/Switch Unit Family 34970A 34972A Technical Overview”.
- [25] Fluke Calibration, “6102/7102/7103 Microbaño de Fluke Calibration”. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/es/calibradores-de-procesos/calibradores-de-temperatura/fcal-6102-7102-7103-micro-baths.htm?pid=70675>.
- [26] OMRON Corporation, “G6E Low Signal Relay”.
- [27] I. BrandTech® Scientific, “Transferpette® Pipette”, 2015. [Online]. Available: <https://www.brandtech.com/product/transferpette/>.
- [28] Keysight Technologies, “Keysight 34970A/34972A Data Acquisition/Switch Unit User’s Guide”. p. 359.
- [29] F. Morilla García, “El controlador PID”, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2007.

Anexos

Anexo A. Plan de trabajo detallado

El trabajo realizado en este proyecto se ha dividido en cuatro bloques, denominados:

- Bloque 1: Entendimiento y planificación (ver Tabla 12)
- Bloque 2: Diseño e implementación inicial (ver Tabla 13)
- Bloque 3: Diseño e implementación final (ver Tabla 14)
- Bloque 4: Resultados y documentación (ver Tabla 15)

A continuación, se detalla el contenido de cada bloque:

Bloque 1: Entendimiento y planificación	Referencia: WP1	
Descripción: Investigar e involucrarse en el tema mediante la lectura de la tesis y de la información que sea necesaria con tal de conocer la problemática. Además, mantener una reunión con el usuario final (el IBEC) para entender sus necesidades y resolver las cuestiones aparecidas durante la lectura de la tesis. A partir de esto, extraer las especificaciones y los requerimientos del proyecto y empezar a investigar las posibles soluciones para sus problemas.	Fecha de inicio: 15/02/2016 Fecha de fin: 23/03/2016	
Tarea T1: Leer la tesis de Maria Valeska para entender el problema del que se parte. Tarea T2: Reunión con el IBEC para extraer los requerimientos y las especificaciones iniciales. Tarea T3: Documentar el proyecto (PPWP). Tarea T4: Búsqueda de información para empezar el diseño de la solución desarrollada.	Entregables: PPWP	Fecha: 01/03/2016

Tabla 12. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP1.

Bloque 2: Diseño e implementación inicial	Referencia: WP2	
Descripción: Diseñar e implementar una primera solución (que consistirá en controlar los ciclos de temperatura de una micro placa). Para ello, diseñar e implementar primeramente el actuador, investigando sobre materiales y procedimientos (adaptados a las condiciones de trabajo del IBEC) que consigan hacer cambios rápidos de temperatura. A continuación, diseñar e implementar el software y hardware necesarios para implementar el control y poder obtener el valor de la temperatura a lo largo del tiempo. Finalmente, con tal de validar la primera solución, se realizará un test sin células (sólo con agua) en las instalaciones del IBEC.	Fecha de inicio: 24/03/2016 Fecha de fin: 01/06/2016	
Tarea T1: Diseñar e implementar el actuador. Tarea T2: Diseñar e implementar el hardware para el control. Tarea T3: Diseñar e implementar el software para el control. Tarea T4: Realizar tests internos del primer prototipo. Tarea T5: Validar el primer prototipo en las instalaciones del IBEC (y obtener su feedback para futuras modificaciones).	Entregables: Primer prototipo	Fecha: 31/05/2016

Tabla 13. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP2.

Bloque 3: Diseño e implementación final		Referencia: WP3	
Descripción: Diseñar e implementar un prototipo final con las correcciones necesarias observadas en el test en el IBEC. Para ello, corregir lo que sea necesario: actuador, hardware y/o software. Se realizarán varios tests internos para verificar que las condiciones finales satisfacen los requerimientos y especificaciones iniciales y se procederá a su validación en un test en el IBEC con células madre.		Fecha de inicio: 02/05/2016 Fecha de fin: 08/07/2016	
Tarea T1: Documentar el proyecto (Critical Review). Tarea T2: Modificaciones en el actuador (si se requiere). Tarea T3: Modificaciones en el hardware (si se requiere). Tarea T4: Modificaciones en el software (si se requiere). Tarea T5: Realizar tests internos del prototipo final (y extraer las características finales). Tarea T6: Validar el prototipo final en las instalaciones del IBEC (y observar si cumple los objetivos iniciales)		Entregables: Critical Review Prototipo final	Fecha: 09/05/2016 07/07/2016

Tabla 14. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP3.

Bloque 3: Resultados y documentación		Referencia: WP4	
Descripción: Para acabar, sería muy interesante obtener resultados por parte del IBEC para saber si este proyecto ha resultado beneficioso para ellos. Estos resultados podrían convertirse en una comparación del antes y el después de la aplicación de la mejora desarrollada y extraer sus beneficios reales. Esto ayudaría además a documentar la tesis del proyecto y añadiría valor a la misma. Finalmente, documentar y exponer el trabajo realizado.		Fecha de inicio: 31/05/2016 Fecha de fin: 11/07/2016	
Tarea T1: Analizar los resultados obtenidos del IBEC Tarea T2: Documentar el proyecto (memoria) Tarea T3: Preparar la presentación y presentar		Entregables: Memoria TFG	Fecha: 27/06/2016

Tabla 15. Descripción, tareas, entregables y fechas del WP4.

Finalmente, se expresan en forma de tabla los hitos que se pretendían alcanzar con la realización de este proyecto:

WP	Tarea	Descripción	Hito / entregable	Semana
WP1	T3	Documentar proyecto	Project Proposal & Work Plan	3
WP2	T5	Test prototipo inicial	Prototipo inicial	16
WP3	T1	Documentar proyecto	Critical Review	13
WP3	T6	Test prototipo final	Prototipo final	21
WP4	T1	Resultados	Analizar resultados del IBEC	22
WP4	T2	Documentar proyecto	Memoria final del TFG	20
WP4	T3	Presentar proyecto	Presentación	23

Tabla 16. Hitos del proyecto.

Anexo B. Consideraciones en el diseño del actuador

Comparación del comportamiento de la temperatura en la superficie de una celda Peltier con y sin refrigerador líquido

Se hicieron varios tests con una Peltier sola y se observó que, después de un tiempo de haber alcanzado el límite superior (37 °C), cuando se invertía la polaridad para enfriar, llegaba un punto en el que la celda Peltier ya no era capaz de bajar hasta el límite inferior (24 °C). Esto ocurría porque la celda Peltier no era capaz de extraer el calor generado. Por ello, se decidió incorporar el refrigerador líquido (el modelo 416601U00000G de 4 pases de Aavid Thermalloy). A continuación, se puede ver una comparación del comportamiento de la temperatura medida directamente en la celda Peltier. En el primer caso, se mide ésta sin refrigerador. En el segundo caso, se coloca el refrigerador, pero no se conecta al circuito de agua. Finalmente, en la tercera gráfica se puede ver el efecto del refrigerador cuando circula agua del grifo por su interior.

FASES	SEGUNDOS
0 - 5 segundos: OFF	5
6 - 35 segundos: ON (enfriar)	29
36 - 45 segundos: ON (calentar)	9
46 - 222 segundos: OFF (enfriar)	176

Tabla 17. Condiciones del test de una celda Peltier sin refrigerador.

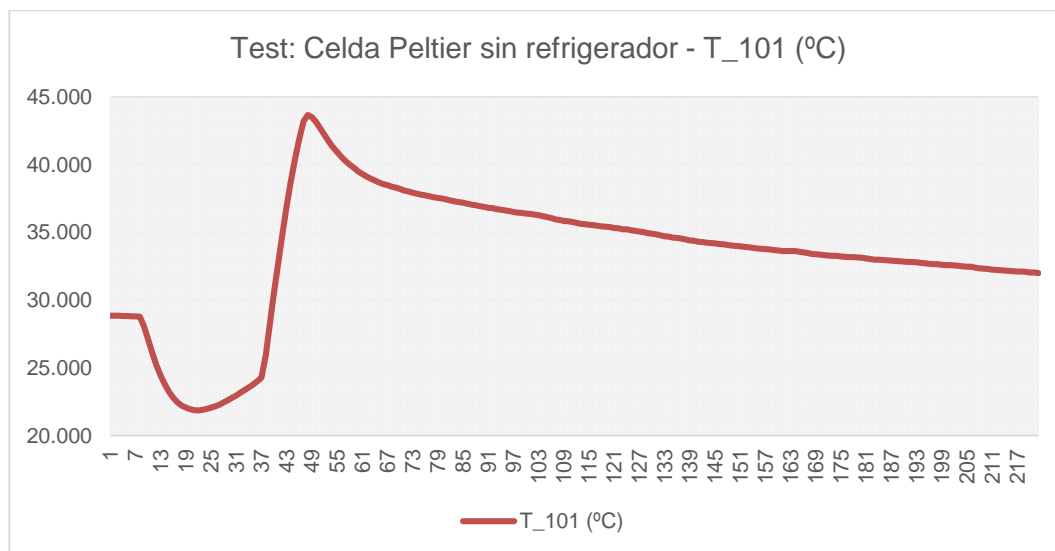


Figura 33. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier sin refrigerador.

FASES	SEGUNDOS
0 - 5 segundos: OFF	5
6 - 35 segundos: ON (enfriar)	29
36 - 47 segundos: ON (calentar)	11
46 - 87 segundos: OFF (enfriar)	41

Tabla 18. Condiciones del test de una celda Peltier con el refrigerador apagado.

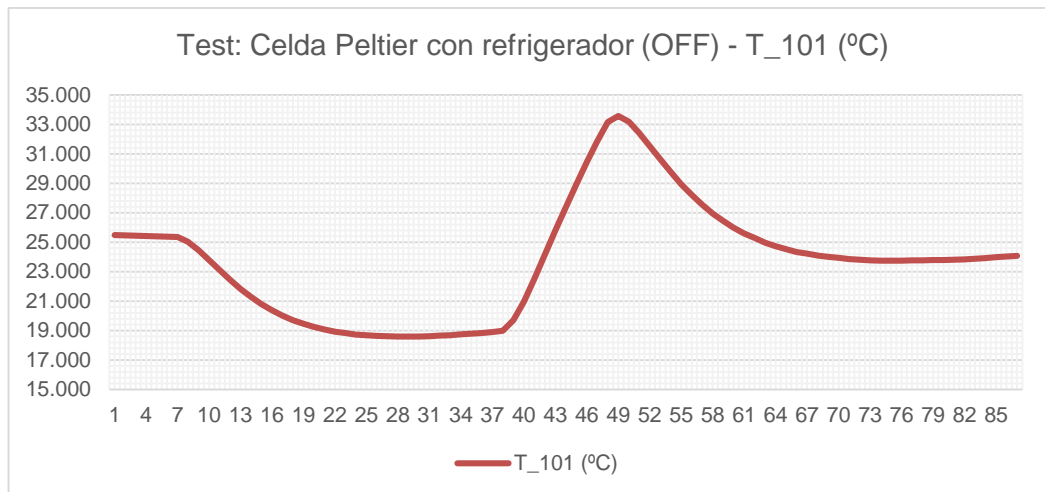


Figura 34. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier con el refrigerador apagado.

FASES	SEGUNDOS
0 - 5 segundos: OFF	5
6 - 15 segundos: ON (enfriar)	9
16 - 30 segundos: ON (calentar)	14
31 - 50 segundos: ON (enfriar)	19
51 - 65 segundos: ON (calentar)	14

Tabla 19. Condiciones del test de una celda Peltier con el refrigerador encendido.

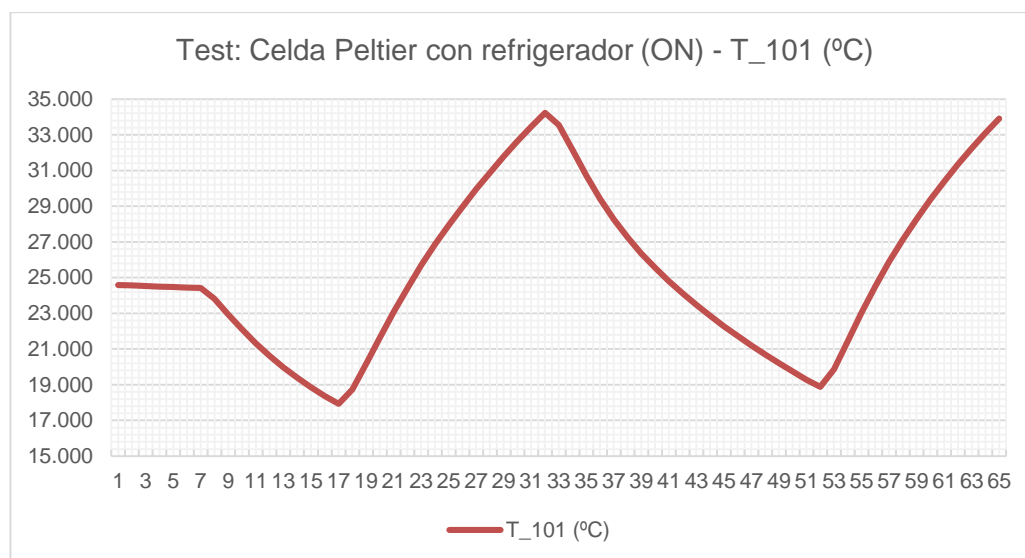


Figura 35. Respuesta de la temperatura de una celda Peltier con el refrigerador encendido.

En el primer test (Figura 33) se puede apreciar cómo, entre los 22 y 36 segundos debería estar enfriando y sin embargo no lo hace. Además, el segundo ciclo de enfriar es mucho más lento porque el calor se va acumulando. Estos efectos se observaron en varios tests y por ello se decidió añadir el refrigerador líquido. En el segundo test (Figura 34), cuando ya se ha colocado el refrigerador, pero no se hace circular el agua todavía, se observa que esta anomalía mejora, ya que para los mismos segundos ya no calienta, sino que se queda estable en la temperatura correspondiente. Aun así, tampoco enfría más. Finalmente, en el test con el refrigerador conectado al circuito de agua (Figura 35) se ve claramente que la acción se realiza de manera correcta y que el problema ha sido resuelto.

Comparación del comportamiento de la temperatura medida en la superficie de la celda Peltier o en la superficie del pocillo de la micro placa

Se decidió comparar la temperatura medida con el termopar directamente en la superficie de la Peltier y medida el fondo de los pocillos de la micro placa. Cuando se hizo la comparación, se observó que los tiempos alcanzados eran muy distintos.

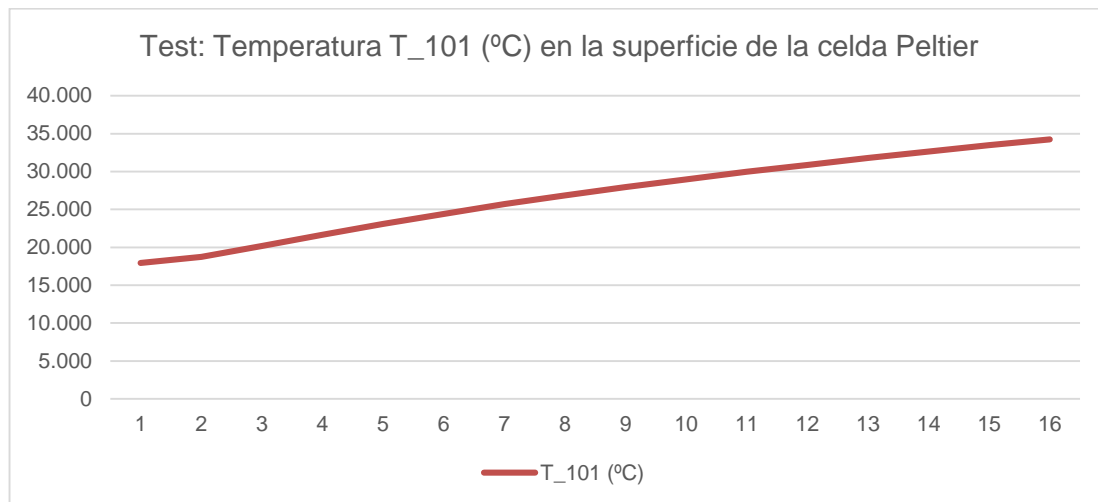


Figura 36. Respuesta de la temperatura en la cara superior de la celda Peltier.

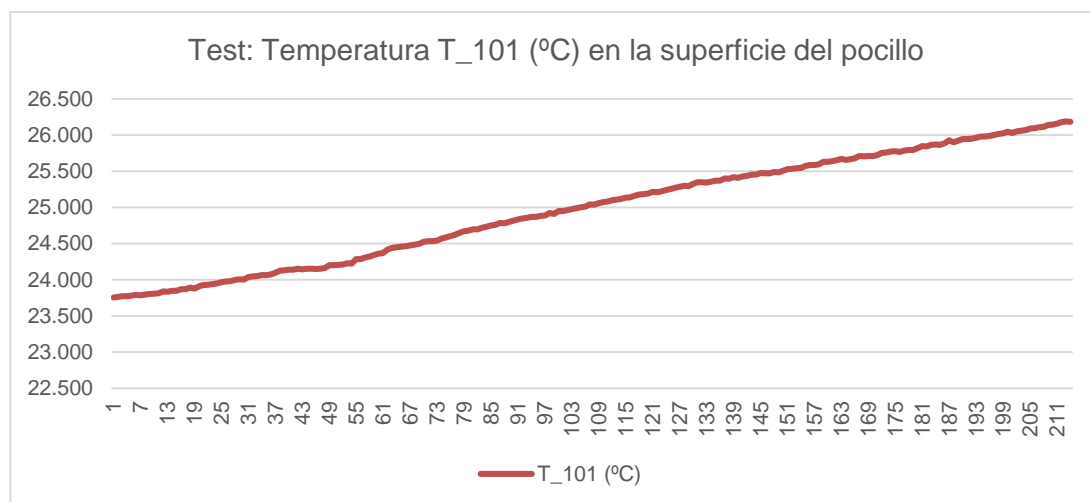


Figura 37. Respuesta de la temperatura en el fondo del pocillo de la micro placa.

En la primera gráfica (Figura 36), que corresponde a la medida directamente en la superficie de la celda Peltier se ve cómo la temperatura varía de 18 °C a 34 °C en 16 segundos, mientras que en la segunda gráfica (Figura 37), la medida en el fondo del pocillo, se ve cómo la temperatura apenas cambia 3 °C en 213 segundos.

Se comprobó así que el acoplo térmico entre celda Peltier y micro placa no era bueno ya que había una diferencia muy grande entre ambas respuestas. Se concluyó que esto era debido a que ambas superficies en contacto (la celda superior de la Peltier y la base de la micro placa) son muy planas, aunque con algunas aristas que sobresalen y se crean huecos entre ellas en los que no se está haciendo una buena transferencia de calor. Para poner remedio a esto, se hizo un estudio con varios materiales hasta concluir cual era la mejor solución.

Comparación de la velocidad y la homogeneidad de las distintas configuraciones del actuador

Se decidió comparar la temperatura medida con varias configuraciones con materiales distintos. Se midieron los 6 termopares cada segundo durante un minuto para cada configuración.

En la Figura 39, se compara la respuesta del termopar 104 y se comprueba como la configuración 1 da mejores resultados en cuanto a la velocidad ya que en el mismo tiempo alcanza una temperatura mayor que el resto de configuraciones. Sin embargo, si comparamos la homogeneidad (Figura 38), se puede ver como las medidas de esta configuración están muy dispersas, presentando diferencias de temperatura muy grandes entre los distintos pocillos. Como interesa tener la máxima homogeneidad de temperatura posible en toda la micro placa, se cubrió toda su base con celdas Peltier para garantizar la misma temperatura en todos los puntos.

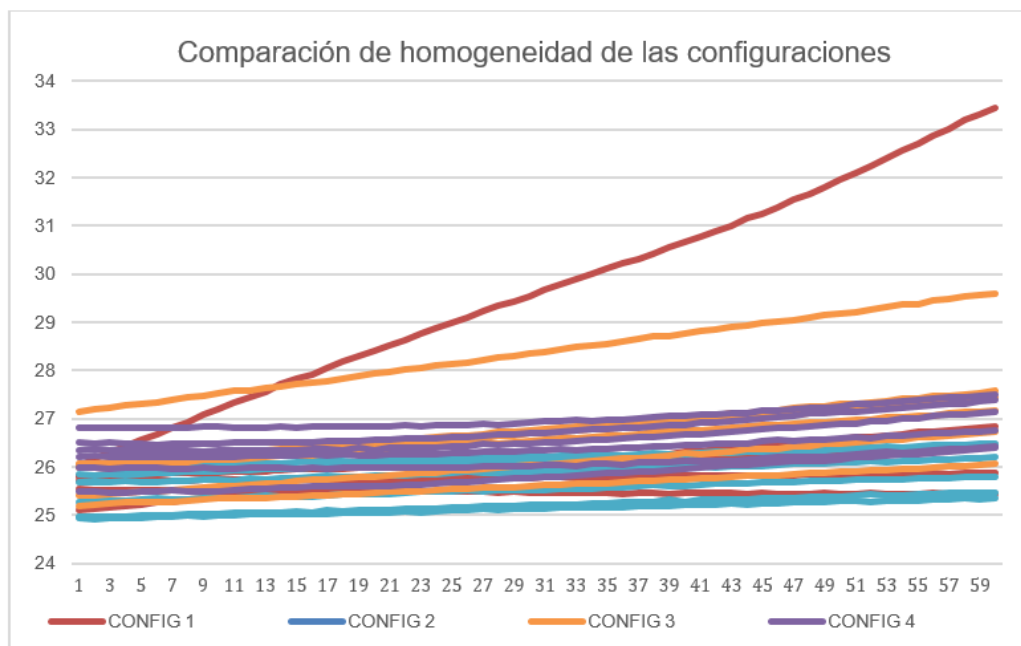


Figura 38. Comparación de la homogeneidad de diferentes configuraciones del actuador.

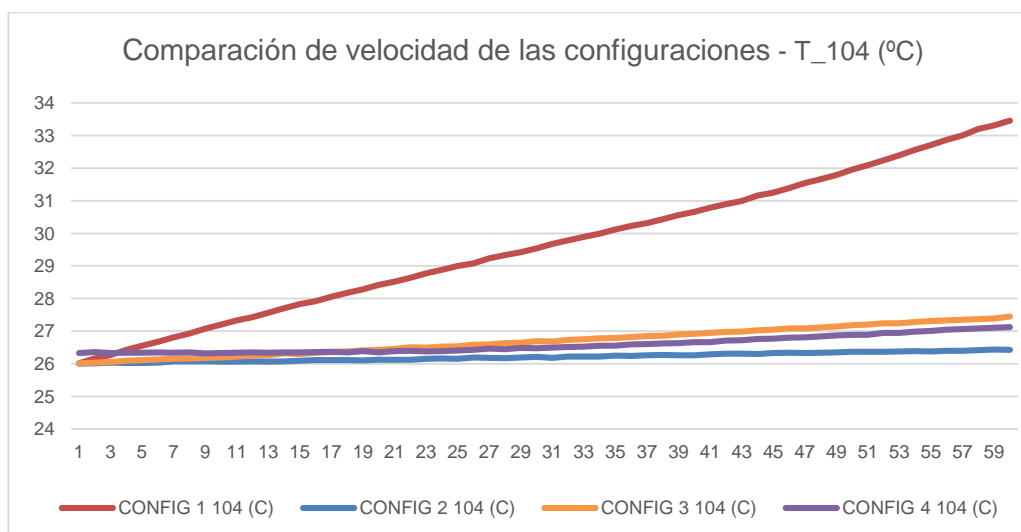


Figura 39. Comparación de la velocidad de diferentes configuraciones del actuador.

Anexo C. Consideraciones en la implementación del control

Adquisición de datos con Agilent 34972A

La visión de conjunto del sistema de adquisición de datos (DAQ) puede verse en la Figura 40. Se trata de un ordenador que, en el caso del DAQ usado para este proyecto (el Agilent 34972A de Keysight Technologies), se puede conectar mediante un cable USB. En el DAQ se pueden conectar una serie de módulos y estos módulos pueden conectarse a distintos sensores, transductores u otros elementos.

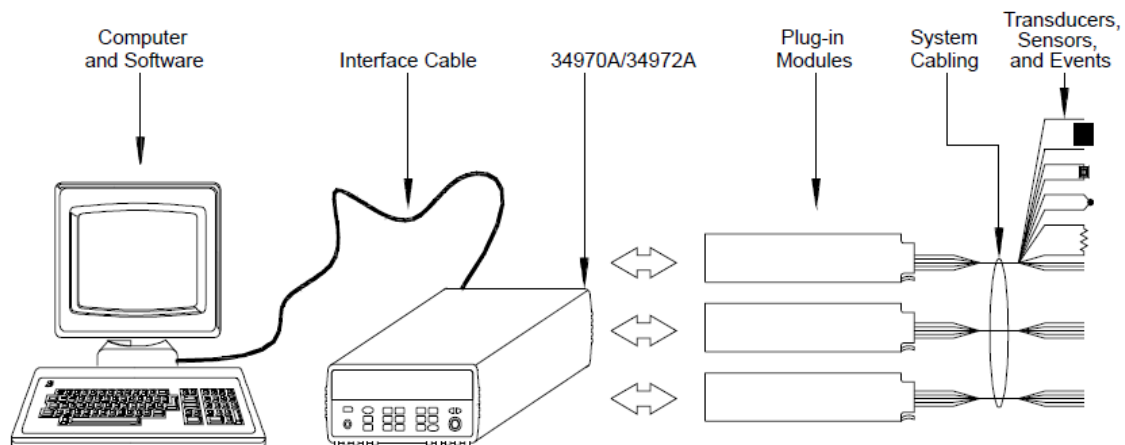


Figura 40. Diagrama de un sistema de adquisición de datos (DAQ). Fuente: [28].

Para este proyecto se han usado los módulos Agilent 34901A y Agilent 34907A. El primero consiste en un multiplexor de 20 canales con unión fría de referencia, con lo que es ideal para medir la temperatura con termopares. El segundo es un módulo multifunción. Se escogió porque daba la posibilidad de controlar salidas digitales y analógicas, aunque como las analógicas no daban suficiente corriente para alimentar las celdas Peltier, al final no se usaron y en su lugar se diseñó un circuito con relés (tal y como se ha explicado en apartados anteriores). En la Figura 41 se pueden ver con más detalle las características de dichos módulos y de todos los que se pueden conectar a este DAQ.

Agilent Modules-at-a-Glance Selection Guide

Model Description	Type	Speed (ch/sec)	Max Volts	Max Amps	Bandwidth	Thermal Offset	Comments	Page
34901A 20 ch Multiplexer	2-wire armature (4-wire selectable)	60	300 V	1A	10 MHz	< 3 μ V	Built-in cold junction reference 2 additional current channels (22 total)	18
34902A 16 ch Multiplexer	2-wire reed (4-wire selectable)	250	300 V	50 mA	10 MHz	< 6 μ V	Built-in cold junction reference	19
34903A 20 ch Actuator/GP Switch	SPDT/form C	120	300 V	1A	10 MHz	< 3 μ V		20
34904A 4 x 8 Matrix	2-wire armature	120	300 V	1A	10 MHz	< 3 μ V		20
34905A Dual 4 ch RF Mux 50 Ω	Common Low (unterminated)	60	42 V	0.7 A	2 GHz	< 6 μ V	1 GHz bandwidth through BNC-to-SMB adapter cable	21
34906A Dual 4 ch RF Mux 75 Ω	Common Low (unterminated)	60	42 V	0.7 A	2 GHz	< 6 μ V	1 GHz bandwidth through BNC-to-SMB adapter cable	21
34907A Multifunction Module	Two 8-bit digital I/O ports 26-bit Event Counter Two 16-bit Analog outputs		42 V 42 V ± 12 V	400 mA 10 mA	100 KHz dc		Open drain Selectable input threshold Max 40 mA total output per frame	22
34908A 40 ch Single-Ended Mux	1-wire armature (common low)	60	300 V	1A	10 MHz	< 3 μ V	Built-in cold junction reference No four-wire measurements	19

Figura 41. Características de los módulos compatibles con el DAQ. Fuente: [24].

Así, estos módulos se conectaron al DAQ de la siguiente manera:



Figura 42. Conexión de los módulos Agilent 34901A y 34907A en el DAQ.

Módulo Agilent 34901A (20 Channel Multiplexer)

Este módulo está conectado en ranura 1 del DAQ, tal y como se puede apreciar en la Figura 42. Sus características, según [24] pueden verse en la Figura 41.

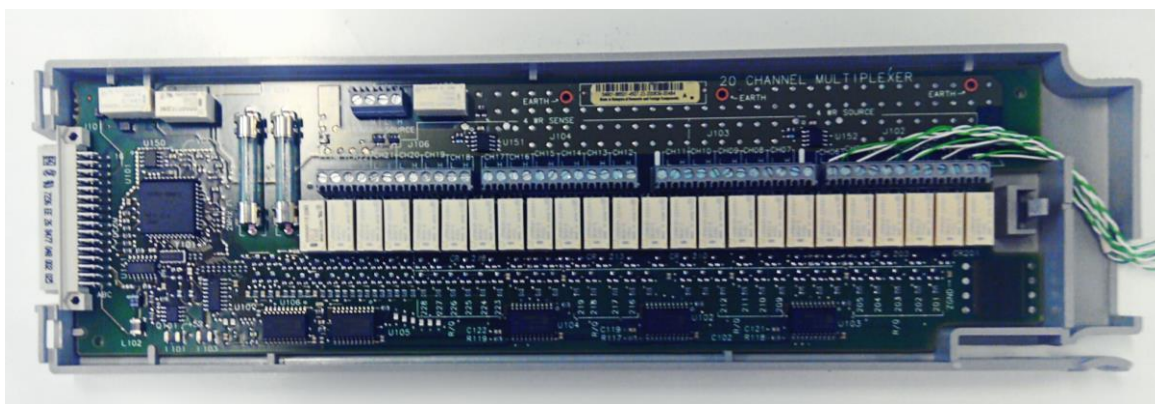


Figura 43. Conexiones físicas en el módulo Agilent 34901A.

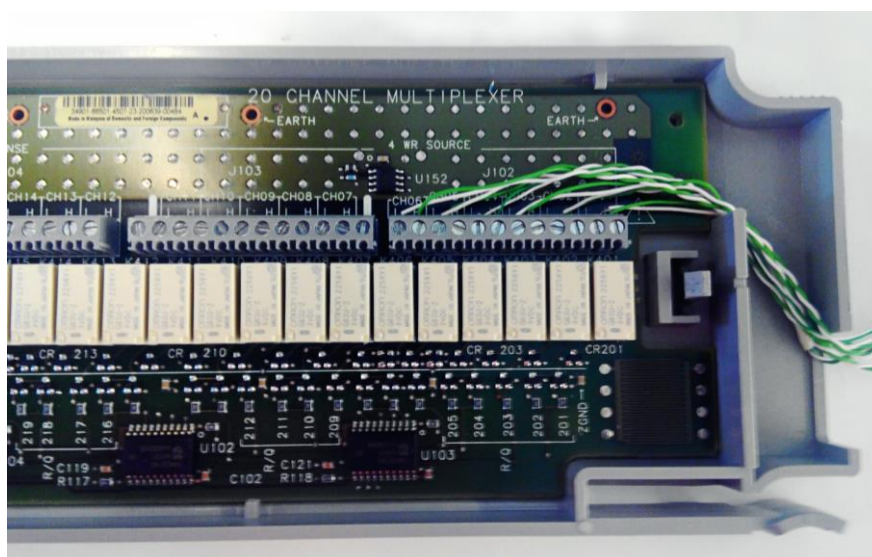


Figura 44. Detalle de las conexiones físicas en el módulo Agilent 34901A.

Tal y como se aprecia en las Figuras 43 y 44. Los termopares se conectaron físicamente en los canales 01, 02, 03, 04, 05 y 06. En el terminal L (de “Low”) se conecta el cable blanco (masa) y en el terminal H (“High”) se conecta el cable verde (alimentación).

Es por esto, que cuando nos referimos a los termopares, lo hacemos con los códigos 101, 102, 103, 104, 105 y 106 ya que para el desarrollo del software se pide el código de los termopares formado por tres números, siendo el primer número la ranura que ocupa el módulo en el DAQ (en este caso es 1 ya que se conectó este módulo a la primera ranura) y siendo los dos siguientes el canal.

Módulo Agilent 34907A (Multifunction Module DIO / Totalize / DAC)

Este módulo está conectado en ranura 2 del DAQ, tal y como se puede apreciar en la Figura 42. Sus características, según [24] pueden verse en la Figura 41.

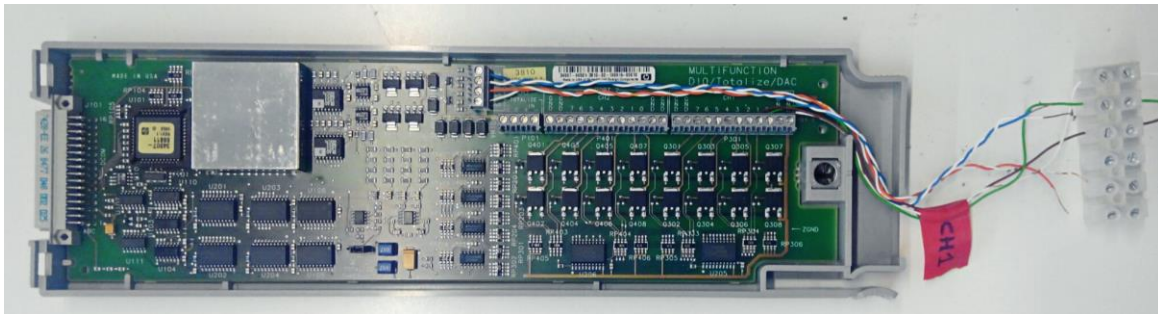


Figura 45. Conexiones físicas en el módulo Agilent 34907A.

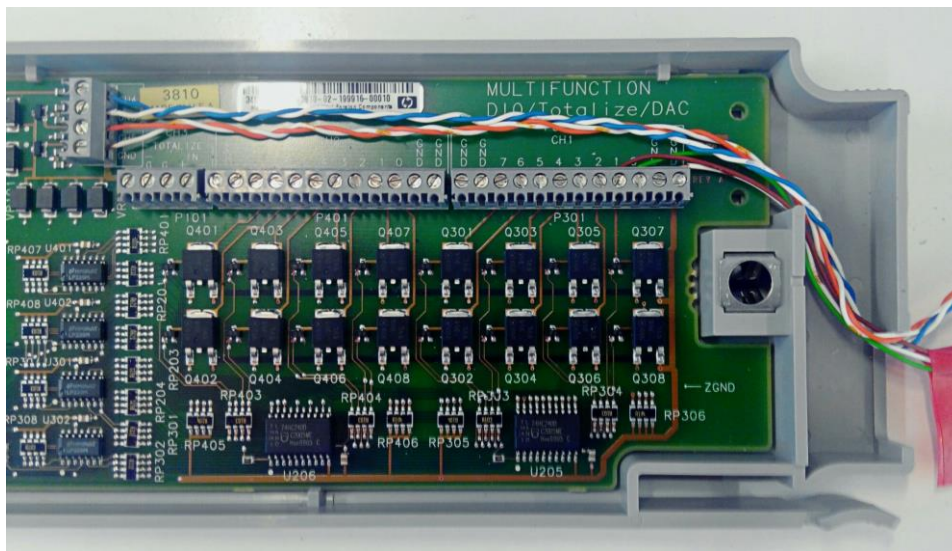


Figura 46. Detalle de las conexiones físicas en el módulo Agilent 34907A.

Tal y como puede comprobarse en las Figuras 45 y 46, se decidió conectar cables en los bits 0 (cable verde) y 1 (cable marrón) y en la masa (cable blanco) del canal 1 (canal digital). Además, a pesar de que en el prototipo final no se usan (porque como se ha explicado anteriormente, se usaron relés en su defecto) también hay cables conectados a las salidas de los canales analógicos 4 (cables azul-blanco) y 5 (cables naranja-blanco).

Es por esto, que cuando se hace referencia a los bits de control, se quiere indicar los dos primeros bits (0 y 1) del canal 1, ya que es donde se ha realizado la conexión.

Anexo D. Consideraciones para la caracterización del control

Para caracterizar el control, hay que definir sus parámetros PID. Con tal de calcularlos, se usó el método basado en la curva de reacción.

Se decidió medir la respuesta de las celdas Peltier para el caso de calentar (Figura 47) y para el caso de enfriar (Figura 48). En el caso de enfriar se invirtió la gráfica para poder medir los parámetros.

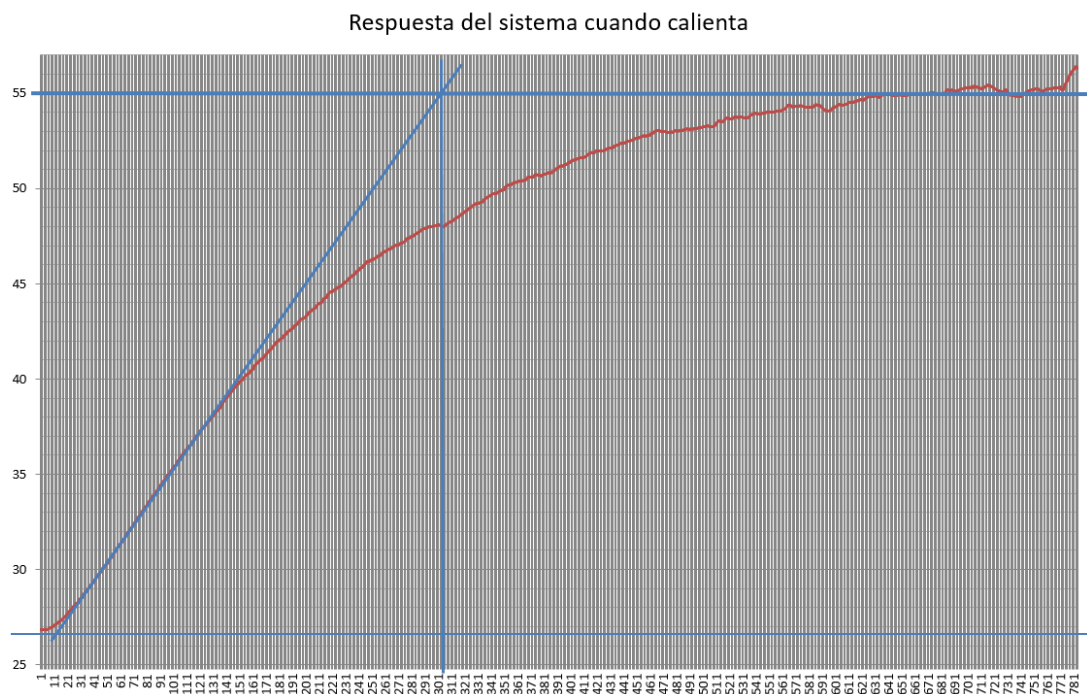


Figura 47. Respuesta del sistema cuando calienta.



Figura 48. Respuesta del sistema cuando enfría.

De las gráficas anteriores se obtuvo:

	Modo Calentar	Modo Enfriar
K	$26.5 - 20 = 6.5$	$55 - 27 = 9$
τ_0	8 s	9 s
τ	200 s	260 s

Tabla 20. Parámetros obtenidos a partir del método basado en la curva de reacción.

Entonces, los parámetros del control PID son los de la Tabla 21 y se obtiene la Figura 49.

	Modo Calentar	Modo Enfriar
K_p	$\frac{1.2 \cdot \tau}{K \cdot \tau_0} = 3.85$	$\frac{1.2 \cdot \tau}{K \cdot \tau_0} = 4.62$
T_i	$2 \cdot \tau_0 = 0.27 \text{ min}$	$2 \cdot \tau_0 = 0.3 \text{ min}$
T_d	$0.5 \cdot \tau_0 = 0.067 \text{ min}$	$0.5 \cdot \tau_0 = 0.075 \text{ min}$

Tabla 21. Parámetros PID calculados para el modo calentar y para el modo enfriar.

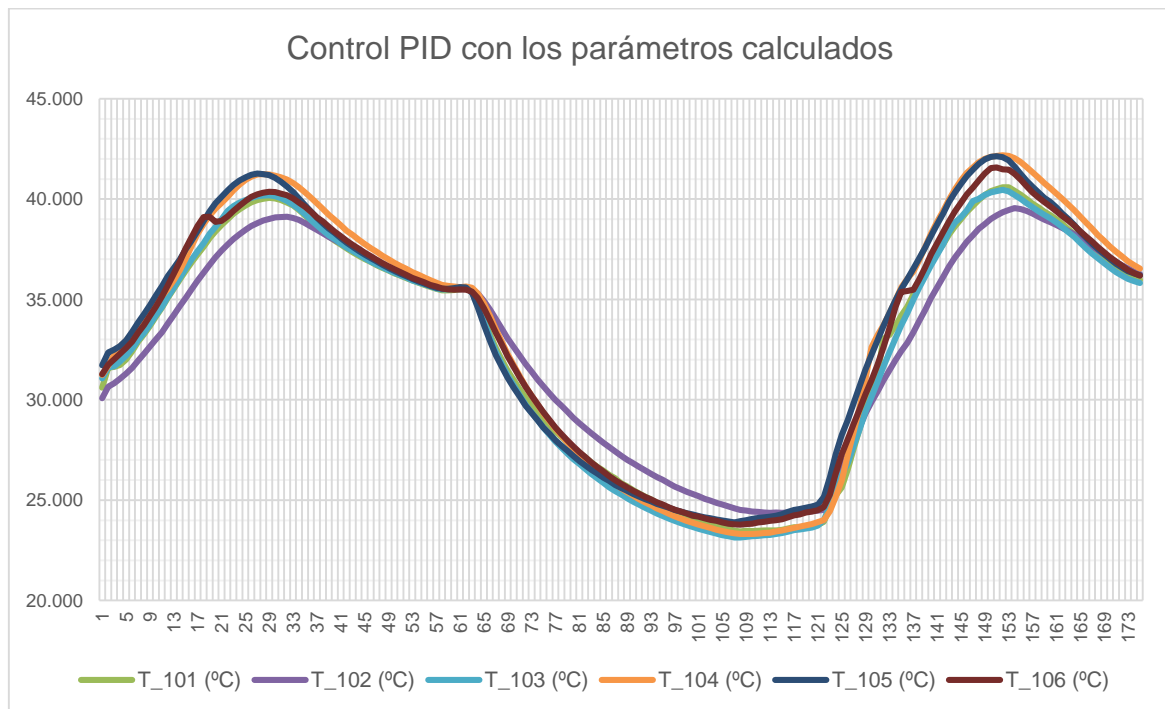


Figura 49. Respuesta del control PID con los parámetros calculados.

Si se desea una respuesta diferente, se pueden ajustar los parámetros PID teniendo en cuenta algunas reglas heurísticas de ajuste como las que se muestran en la Tabla 22.

	K_p aumenta	T_i disminuye	T_d aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado

Tabla 22. Reglas heurísticas de ajuste de los parámetros PID. Fuente: [29].

Anexo E. Consideraciones para el entendimiento del software en LabVIEW

Bloques de LabVIEW usados en el desarrollo del software

Para el desarrollo del software en LabVIEW, se han usado varios bloques, tanto del programa como de los drivers instalados. A continuación, se exponen los más relevantes:

- **Estructura While:** Una estructura While (Figura 50) ejecuta el código indefinidamente hasta que se cumple una condición.

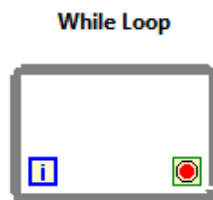


Figura 50. Estructura While en LabVIEW. **Fuente:** Ayuda de LabVIEW.

- **Estructura For:** Una estructura For (Figura 51) ejecuta un subdiagrama un número de veces establecido, normalmente denominado con la variable N . Es decir, ejecuta el subdiagrama contenido en su interior N veces.

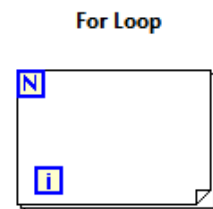


Figura 51. Estructura For en LabVIEW. **Fuente:** Ayuda de LabVIEW.

- **Estructura Case:** Una estructura de Case (Figura 52) tiene dos o más subdiagramas o casos, aunque solamente un caso es visible a la vez y la estructura ejecuta solamente uno a la vez. Es el valor de entrada (conectado al signo de interrogación) el que determina qué subdiagrama se ejecuta.

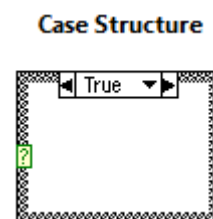


Figura 52. Estructura Case en LabVIEW. **Fuente:** Ayuda de LabVIEW.

- **Estructura Flat Sequence:** Una estructura Flat Sequence (Figura 53) se compone de uno o más subdiagramas que se ejecutan secuencialmente. Esta estructura se usa para asegurar que un subdiagrama se ejecuta antes o después de otro.

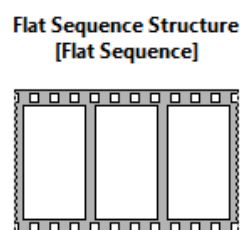


Figura 53. Estructura Flat Sequence en LabVIEW. **Fuente:** Ayuda de LabVIEW.

- **Bloques Initialize y Close:** Bloques del driver instalado para usar el DAQ con LabVIEW. Son los responsables de iniciar y cerrar la comunicación con éste.

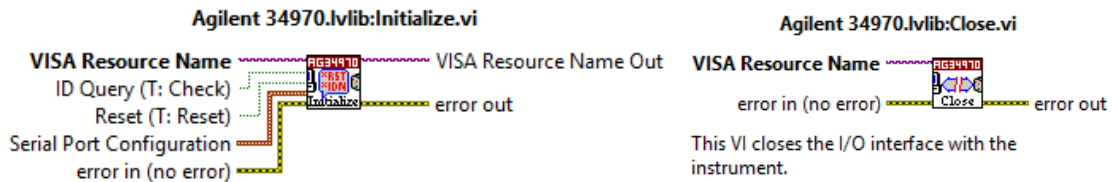


Figura 54. Bloques Initialize y Close del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque Conf EZ:** Bloque del driver instalado para usar el DAQ con LabVIEW. Su función es configurar el instrumento según lo que se pretende medir (en este caso temperatura) y en qué canales.

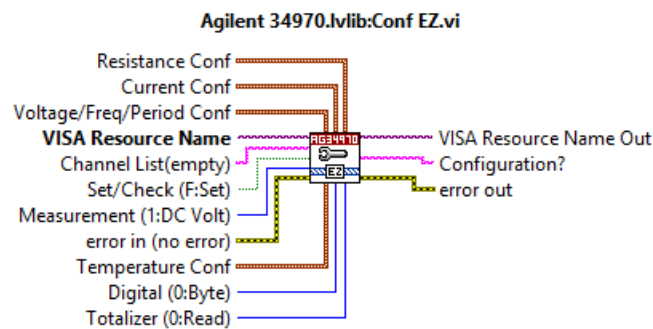


Figura 55. Bloque Conf EZ del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque EZ Temperature:** Bloque del driver instalado para usar el DAQ con LabVIEW. Su función es configurar el instrumento de medida de temperatura (en este caso los termopares) y obtener los valores que éstos proporcionan.

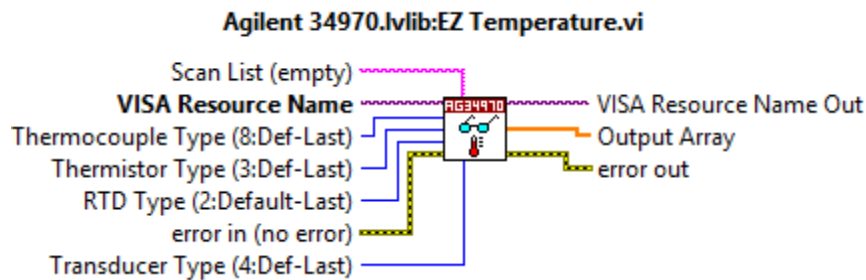


Figura 56. Bloque Conf EZ del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque Digital Output:** Bloque del driver instalado para usar el DAQ con LabVIEW. Su función es dar valores digitales a las salidas de uno de sus módulos (en este caso a los bits de los canales del módulo Agilent 34907A).

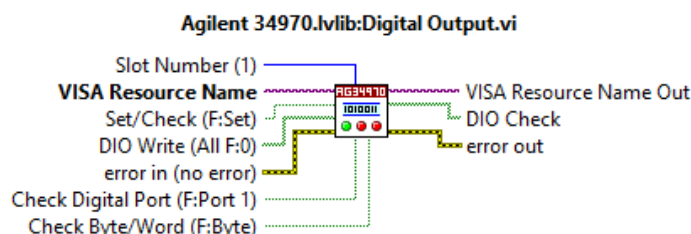


Figura 57. Bloque Digital Output del driver del DAQ. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque Control PID:** Bloque del *PID and fuzzy logic toolkit*. Su función es ejecutar un control PID en función de los parámetros conectados. Sus entradas son: *Output range* (rango de valores posibles para la salida), *Setpoint* (valor que se pretende alcanzar), *Process Variable* (entrada a controlar), *PID gains* (parámetros del control PID), *dt(s)* (tiempo de loop) y *reinitialize* (para reiniciar el control). Las salidas son: *Output* (salida del control PID) y *dt out(s)* (tiempo de loop).

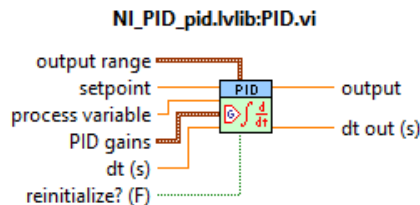


Figura 58. Bloque Control PID de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque Wait Until Next ms Multiple:** Bloque de LabVIEW que espera hasta que el valor es un múltiplo de la entrada (en milisegundos).

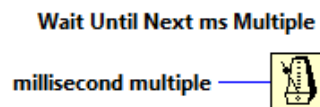


Figura 59. Bloque Wait Until Next ms Multiple de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

- **Bloque Select:** Bloque de LabVIEW que devuelve un valor u otro en función de una condición. En la Figura 60, si *s* es *true*, la función devuelve el valor conectado a *t*. Si *s* es *false*, devuelve el valor de *f*. En este proyecto, se usa para escoger las variables correspondientes al caso de calentar o al caso de enfriar según la condición de entrada. Se estableció que *true* sería el modo calentar y *false* enfriar.

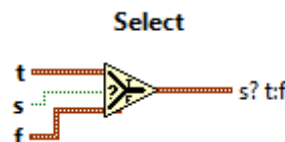


Figura 60. Bloque Select de LabVIEW. Fuente: Ayuda de LabVIEW.

PWM en tiempo

Para realizar el PWM en tiempo después de haber calculado el control PID, se realiza con dos estructuras *For* en serie. Se controla el efecto de la acción a través del tiempo. Así, según el valor de la salida del PID se conoce si la acción debe ser más o menos contundente y, por tanto, actuar más o menos tiempo.

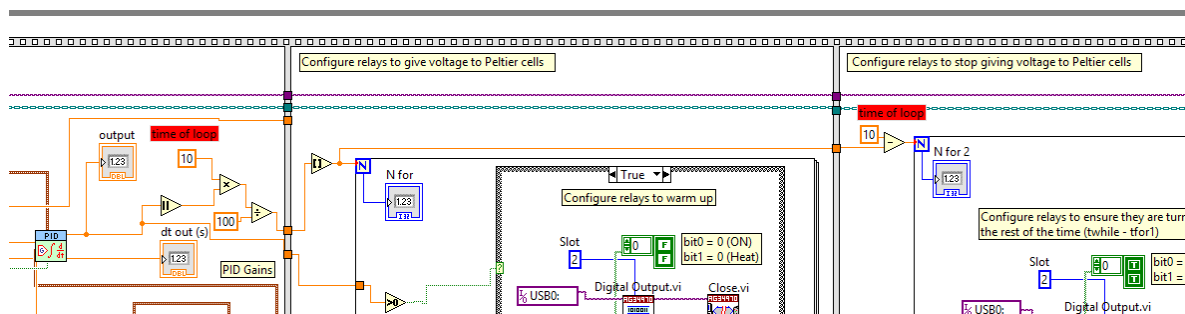


Figura 61. Detalle del software en LabVIEW donde se ve el PWM en tiempo.

Para ello, la primera estructura *For* se encarga de realizar la acción correspondiente (es decir, activar los bits correspondientes para calentar o enfriar, según el signo de la salida del bloque PID). En cambio, el segundo *For* lo que hace es desactivar las celdas Peltier. Para saber cuánto tiempo deben ejecutarse uno y otro, se calcula el siguiente factor de conversión:

$$N_{for_{ON}} = \frac{t_{while} \cdot |out_{PID}|}{100} = \frac{10 \cdot |out_{PID}|}{100}$$

donde $N_{for_{ON}}$ es el número de repeticiones de la estructura *For* donde se lleva a cabo la acción en las Peltier (este número debe ser un entero, así que en LabVIEW el cálculo se redondea al entero más próximo), t_{while} es el tiempo del bucle principal, es decir, cada cuantos segundos se ejecuta el bucle (para esta aplicación son 10 segundos), $|out_{PID}|$ es el valor absoluto de la salida que proporciona el bloque PID y el 100 se corresponde al máximo de salida que puede dar el bloque PID.

Entonces:

$$N_{for_OFF} = t_{while} - N_{for_acción} = 10 - N_{for_acción}$$

donde N_{forOFF} es el número de repeticiones de la estructura *For* donde se apagan las celdas Peltier.

Selección del modo (calentar o enfriar)

Para poder seleccionar el *Setpoint* correspondiente y los parámetros PID correctos, debemos conocer primero si se encuentra en el ciclo de calentamiento o de enfriamiento.

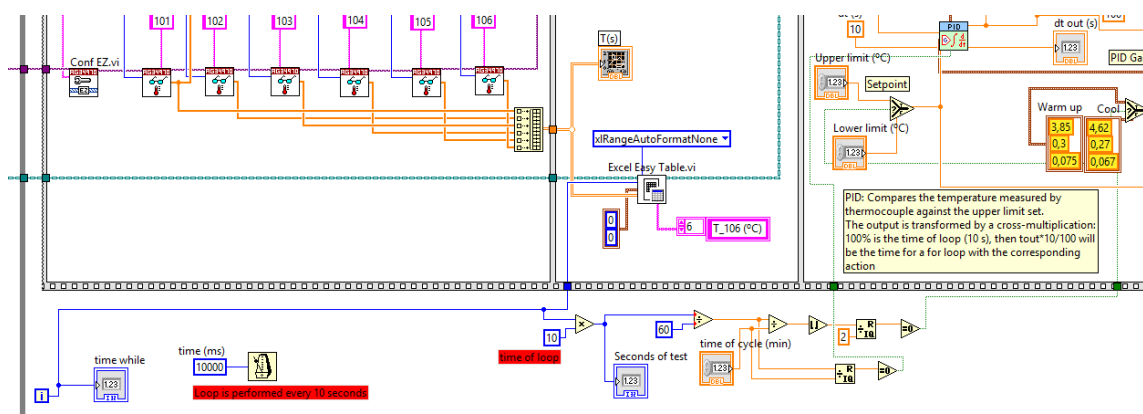


Figura 62. Detalle del software en LabVIEW donde se ven las funciones del bloque Select.

Sabiendo que la estructura *While* se ejecuta cada 10 segundos (debido a que se ha configurado un bloque *Wait Until Next ms Multiple* con 10000 milisegundos), la variable “i” del bucle sumará 1 cada 10 segundos. Así, podemos convertirla en segundos multiplicando por 10 y éste a su vez convertirlo en minutos dividiendo entre 60. Así, tendremos el tiempo de ejecución. Este tiempo se puede dividir entre el tiempo de ciclo (introducido por el usuario en el panel frontal), obteniendo una fracción que se redondea a la baja. El número obtenido se divide entre dos y se calcula el módulo de dicha división. Si el módulo es cero, es decir el número es par, la condición será *true*.

Se definió que los pares corresponderían al ciclo de calentamiento (así pues, el programa siempre empezaría calentando) y los impares definirían el modo enfriar. Como puede verse en la Figura 62, si el número es par, la condición será *true* y por tanto el bloque *Select* escogerá las variables correspondientes al caso de calentar. En caso contrario, elegirá las que se corresponden con el caso de enfriar.

Un ejemplo suponiendo que el usuario introduce un tiempo de ciclo (t_{cycle}) de 10 minutos:

<i>i (While)</i>	0	1	2	3	6	12	60	66	120
Segundos ejecución	0	10	20	30	60	120	600	660	1200
Minutos ejecución	0	1/6	2/6	3/6	1	2	10	11	20
División entre t_{cycle}	0	1/60	2/60	3/60	1/10	2/10	1	11/10	2
Redondeo a la baja	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Módulo división entre 2	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Paridad	Par	Par	Par	Par	Par	Par	Impar	Impar	Par
Modo	C	C	C	C	C	C	E	E	C

Tabla 23. Ejemplo del cálculo de la selección del modo en LabVIEW.

Reinicio de la memoria en el bloque PID

Como se vio que la memoria del PID daba problemas en los ciclos, se decidió reiniciarla cada vez que empezara un nuevo ciclo, tal y como se aprecia en la Figura 62.

Para ello, se calcula el módulo entre el tiempo de ejecución (en minutos) y el tiempo de ciclo (introducido por el usuario en el panel frontal) y se calcula el módulo de la división. Así, si el resultado es 0, sabemos que se trata de un número entero y que por tanto nos encontramos en el primer segundo de cada ciclo, como se ve en el ejemplo siguiente. Cuando eso ocurra, la condición valdrá *true* y por tanto la entrada correspondiente al reinicio del PID también será *true*.

Un ejemplo suponiendo que el usuario introduce un tiempo de ciclo (t_{cycle}) de 10 minutos:

<i>i (While)</i>	0	1	2	3	6	12	60	66	120
Segundos ejecución	0	10	20	30	60	120	600	660	1200
Minutos ejecución	0	1/6	2/6	3/6	1	2	10	11	20
División entre t_{cycle}	0	1/60	2/60	3/60	1/10	2/10	1	11/10	2
Módulo división entre 2	0	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	0	$\neq 0$	0
Reinicio?	True	False	False	False	False	False	True	False	True

Tabla 24. Ejemplo del cálculo para el reinicio del bloque PID de LabVIEW.

Interface de usuario

En la Figura 63 se ve cómo el usuario final debe introducir los límites de temperatura y el tiempo de ciclo antes de ejecutar el programa.

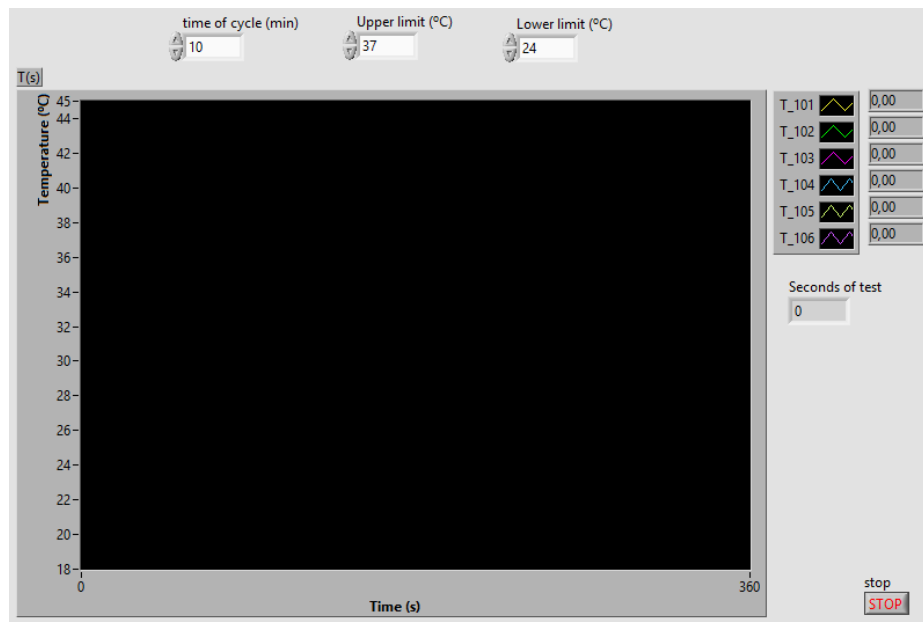


Figura 63. Panel frontal de LabVIEW que hace de interface de usuario.

Anexo F. Consideraciones para mejoras y líneas futuras

Código VBA de la macro en Excel

El programa de LabVIEW extrae los datos de los seis termopares en serie en una sola columna. Para colocarlos como es debido, se tuvo que desarrollar una macro en VBA para los ficheros Excel proporcionados por LabVIEW. Esto podría considerarse como una futura mejora del proyecto.

Esta mejora es estética y de practicidad, sobre todo para poder graficar los datos obtenidos de una manera más cómoda. Pero, además, en el caso de un test muy largo, podría suponer problemas mayores ya que se podría alcanzar el límite de filas de Excel y el test podría detenerse por falta de espacio en el fichero.

Se sabe que el límite de filas de un Excel es 199999997 y que se toman 6 muestras cada 10 segundos. Entonces en un minuto se toman 36 muestras y en una hora 2160 y, por tanto, en un día se almacenan 51840 filas en el fichero. Con lo que estamos hablando de que esto supondría un problema solo si el test tuviera una duración mayor a 38 días y medio, lo cual es muy poco probable que ocurra.

De todas formas, se desarrolló el siguiente código en VBA para poder dar un formato más elegante y cómodo al Excel resultante de LabVIEW:

```
Sub formatExcel()
' Excel macro to give the desired format to output data from LabVIEW
' Author: Carla Alonso Planas
' version 3.0 (30/05/2016)

Dim OriginalRow, OriginalColumn, NumberOfRows As Integer
Dim DestinyRow, DestinyColumn, CurrentRows As Integer
Dim CurrentTime, time, temp As Integer
Dim DestinyColumn1, DestinyColumn2, DestinyColumn3, DestinyColumn4, DestinyColumn5, DestinyColumn6 As Integer

' Constants
DestinyColumn1 = 2 ' Always equal for T_101
DestinyColumn2 = 3 ' Always equal for T_102
DestinyColumn3 = 4 ' Always equal for T_103
DestinyColumn4 = 5 ' Always equal for T_104
DestinyColumn5 = 6 ' Always equal for T_105
DestinyColumn6 = 7 ' Always equal for T_106
OriginalColumn = 1 ' Always equal to 1
OriginalRow = 2 ' We begin reading at row = 2
DestinyRow = 2 ' We begin writing at row = 2
CurrentTime = 0 ' We start measures at 0 seconds
time = 10 ' Takes 1 sample every 10 seconds

' Get the number of existent rows
Range("A1").Select ' We begin counting at first datum
Selection.End(xlDown).Select ' We go down to the last datum
NumberOfRows = ActiveCell.Row ' Number of rows with data

' Move data to the corresponding place
Do While OriginalRow <= NumberOfRows
' Temperature T_101
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn1).Select
ActiveSheet.Paste
```

```
' Temperature T_102
OriginalRow = OriginalRow + 1
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn2).Select
ActiveSheet.Paste

' Temperature T_103
OriginalRow = OriginalRow + 1
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn3).Select
ActiveSheet.Paste

' Temperature T_104
OriginalRow = OriginalRow + 1
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn4).Select
ActiveSheet.Paste

' Temperature T_105
OriginalRow = OriginalRow + 1
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn5).Select
ActiveSheet.Paste

' Temperature T_106
OriginalRow = OriginalRow + 1
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Copy
Cells(DestinyRow, DestinyColumn6).Select
ActiveSheet.Paste

OriginalRow = OriginalRow + 1
DestinyRow = DestinyRow + 1
Loop

' Delete original data from the first column
OriginalRow = 2 ' We begin for the first datum
Do While OriginalRow <= NumberOfRows
    Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
    Selection.ClearContents
    OriginalRow = OriginalRow + 1
Loop

' Get the new number of rows (once data are well placed)
Range("B1").Select
Selection.End(xlDown).Select
CurrentRows = ActiveCell.Row ' New number of rows

' Write the time (in seconds) in the first column
OriginalRow = 2
Do While OriginalRow <= CurrentRows
    Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Value = CurrentTime
    CurrentTime = CurrentTime + time ' Writes 1 row every 10 seconds
    OriginalRow = OriginalRow + 1
Loop

' Delete borders
OriginalRow = CurrentRows + 1
Do While OriginalRow <= NumberOfRows
    Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
```

```

        Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
        OriginalRow = OriginalRow + 1
    Loop

' Draw entire box of last datum
OriginalRow = CurrentRows
Cells(OriginalRow, OriginalColumn).Select
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone

End Sub

```

Código Arduino de la propuesta de sistema mínimo

A continuación, se adjunta el código Arduino desarrollado para la propuesta de sistema mínimo:

```

/* SPcollector - PID Control for Arduino
   by Pol Timoneda and Carla Alonso */

#include <PID_v1.h> // PID Library
#include <Arduino.h> // Arduino Library

// Variables to connect
double Setpoint, Input, Output;
double ReverseOutput, DirectOutput;

// Specify the links and initial tuning parameters
int Setpoint1, Setpoint2, Time1, Time2, Time, seconds, minutes, mode;
String serialReading, aux;
PID myPIDd(&Input, &DirectOutput, &Setpoint, 100, 10, 15, DIRECT);
PID myPIDr(&Input, &ReverseOutput, &Setpoint, 100, 10, 15, REVERSE);

void setup()
{
    // Set PID parameters for Direct PID
    myPIDd.SetMode(AUTOMATIC);
    PID myPIDd(&Input, &DirectOutput, &Setpoint, 5, 16, 4, DIRECT); // Direct PID w/ parameters

    // Set PID parameters for Reverse PID
    myPIDr.SetMode(AUTOMATIC);
    PID myPIDr(&Input, &ReverseOutput, &Setpoint, 4, 18, 5, REVERSE); // Reverse PID w/ parameters

    // Set Output pins in Arduino board
    pinMode(12, OUTPUT); // Pin "DirA"
    pinMode(13, OUTPUT); // Pin "DirB"
    pinMode(6, OUTPUT);

    // Serial configuration
    Serial.setTimeout(10);
    Serial.begin(9600);

    // Default initialization
    Serial.print(0);
    Serial.print(":");
    Serial.print(0);
    Serial.print(";");
    Serial.print(0);
    Serial.println(";");
    seconds = 0;
    minutes = 0;
    mode = 0;
    Setpoint = 0;
    Time = 0;
}

```



```

void loop()
{
    // Setpoint selection
    switch (mode) {
        case 0:
            Setpoint = Setpoint1 * 20.5; // First Setpoint (°C) * correction factor
            Time = Time1; // Cycle Time is now Time1 (in minutes)
            break;
        case 1:
            Setpoint = Setpoint2 * 20.5; // Second Setpoint(°C) * correction factor
            Time = Time2; // Cycle Time is now Time2 (in minutes)
            break;
        default:
            mode = 0;
            break;
    }

    // Read Input value from thermocouple (already amplified)
    Input = analogRead(A0);

    // Direct PID (to heat in case Input < Setpoint)
    if (Input < Setpoint){
        digitalWrite (12, HIGH);
        digitalWrite (13, HIGH);
        myPIDd.Compute();
        Output = DirectOutput;

    // Reverse PID (to cool in case Input > Setpoint)
    }else if (Input > Setpoint){
        digitalWrite (12, LOW);
        digitalWrite (13, LOW);
        myPIDr.Compute();
        Output = ReverseOutput;
    }

    // Write Output value to Arduino board
    analogWrite(3, Output); // Pin "PWM A"
    analogWrite(11, Output); // Pin "PWM B"

    // Timer
    seconds = seconds + 1;
    if (seconds == 1000){
        seconds = 0;
        minutes = minutes + 1;
    }
    // If current time is equal to the time of cycle, changes the mode (heat/cool)
    if (minutes == Time * 6) {
        minutes = 0;
        mode = mode + 1;
        delay(1);
    }
    delay (10);

    //Print Input:Setpoint:TimeLeft;
    Serial.print(Input);
    Serial.print(":");
    Serial.print(Setpoint);
    Serial.print(":");
    Serial.print(Time - minutes / 6);
    Serial.println(";");

    // Read Serial port when something is received
    if (Serial.available() > 0) {
        serialReading = "";
        serialReading = Serial.readString();
        aux = serialReading.length();
    }
}

```

```

/* Correct way of writing in Serial Port: 1020100010100020;
   where:
       10 = Setpoint1 (°C)
       20 = Setpoint2 (°C)
       1 = Stop
       00010 = Time1 (min)
       1 = Stop
       00020 = Time2 (min)
*/

// If the message is in the correct format
if (aux.toInt() == 16){
    // Reinitialize time
    seconds = 0;
    minutes = 0;
    mode = 0;
    Setpoint = 0;
    Time = 0;
    // Set parameters for PID
    Setpoint1 = serialReading.substring(0, 2).toInt();
    Setpoint2 = serialReading.substring(2, 4).toInt();
    Time1 = serialReading.substring(5,10).toInt();
    Time2 = serialReading.substring(11, 16).toInt();
    Serial.println("Correct");
    digitalWrite (6, HIGH);
    delay (100);
    digitalWrite (6, LOW);
    delay (100);
}
}
}

```